



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ και ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Παραμετρική προσομοίωση διάνοιξης σηράγγων
χρησιμοποιώντας Μοντέλα Πληροφορίας Κατασκευών»

Τσίγκας Μιχαήλ, Φοιτητής ΕΜΠ

Επιβλέπων: Τριανταφύλλου Σάββας, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ,

Νοέμβριος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτον από όλους τον Καθηγητή μου Σάββα Τριανταφύλλου για την συνεχή υποστήριξή του από τη στιγμή που ανέλαβε επιβλέπων της Διπλωματικής εργασίας. Οι γνώσεις του και η συνεχή παρουσία του δίπλα μου ήταν πολύτιμα και καθοριστικά στοιχεία για την εκπόνηση της εργασίας.

Ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για τον χρόνο και την διάθεσή τους, καθώς και τα εύστοχα σχόλια τους στο κείμενο που τους υποβλήθηκε.

Ευχαριστώ την εταιρεία Αττικό Μετρό Μονοπρόσωπη ΑΕ για την παραχώρηση των πρωτότυπων σχεδίων μηκοτομής, οριζοντιογραφίας και λεπτομερειών, τμήματος της σήραγγας, ως αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου και όσους συνέβαλλαν με την συνεχή και αστείρευτη συμπαράστασή τους. Η παρούσα εργασία αφιερώνεται σε αυτούς.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	V
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	VII
ABSTRACT.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	11
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	12
1.3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ	13
1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΗΡΑΓΓΑ - Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ.....	17
2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ (TUNNEL INFORMATION MODELLING) (TIM)	17
2.1.1 Μοντέλο πληροφορίας κατασκευών (BIM).....	18
2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ - ΔΟΜΙΚΟ ΜΗΧΑΝΗΜΑ ΤΒΜ.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ REVIT.....	23
3.1 ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ (LODs).....	23
3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (LINNING INFORMATION MODEL).....	25
3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (GROUND INFORMATION MODEL).....	35
3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΡΗΧΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (SHALLOW INFORMATION MODEL)	38
3.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ (TBM INFORMATION MODEL).....	39
3.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΜΑΤΟΣ (GROUT).....	41
3.7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ (BUILT-ENVIRONMENT INFORMATION MODEL).....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ABAQUS.....	51
4.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ABAQUS	51
4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	53
4.2.1 Αριθμητικό μοντέλο εδάφους-Επίπεδα λεπτομέρειας (LODs).....	54
4.2.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb and Ducker Prager.....	58
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΡΓΗΛΟΥ-ΆΜΜΟΥ (CLAY AND SAND MODEL, CASM)	61
4.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	62
4.4.1 Αριθμητικό μοντέλο σήραγγας-Επίπεδα λεπτομέρειας (LODs) (Σχ. 4.6).....	63
4.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΤΙΡΙΩΝ.....	68
4.5.1 Αριθμητικό μοντέλο κτιρίων-Επίπεδα λεπτομέρειας (LODs)(Σχ. 4.10).....	68
4.6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΜΑΤΟΣ.....	70
4.7 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΤΒΜ	73
4.7.1 Αριθμητικό μοντέλο μηχανήματος ΤΒΜ - Επίπεδα λεπτομέρειας (LODs)(Σχ. 4.13).....	73
4.8 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ	75
4.9 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1 ^η).....	77
4.10 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΡΗΧΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 2 ^η).....	86
4.11 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 3 ^η)	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	93

5.1	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1 ^η – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	93
5.2	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 2 ^η – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΗΧΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	98
5.3	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 3 ^η – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ.....	105
5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1 ^η – 3 ^η	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....		119
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	119
6.2	ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	120
6.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....		125

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το πολύπλοκο ζήτημα σχεδιασμού και κατασκευής υπόγειων σηράγγων με τον όρο Μηχανοποιημένες σήραγγες (mechanized tunnels). Συγκεκριμένα, διερευνώνται οι δυνατότητες που παρέχουν σύγχρονες διαδικασίες παραμετρικής μοντελοποίησης για τον σχεδιασμό και την ανάλυση κατασκευαστικών λύσεων. Εξετάζεται η μέθοδος μοντελοποίησης Tunnel Information Modelling (TIM) η οποία τείνει να γίνεται ολοένα και περισσότερο διαδεδομένη λόγω της ευχέρειας που φαίνεται να προσφέρει στον Πολιτικό μηχανικό.

Ένας διαυγής, ολιστικός και λεπτομερής σχεδιασμός, συστημάτων και διαδικασιών σε έργα όπως αυτό της μηχανοποιημένης σήραγγας είναι απαραίτητο στοιχείο για μία εύρωστη και χαμηλού επιπέδου ρίσκου διακινδύνευσης, κατασκευή. Στο πλαίσιο αυτό, σημαντική συμβολή και επιρροή διαθέτουν και παραθέτουν οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του εδάφους, του μηχανήματος διάνοιξης TBM, της διανοιγόμενης σήραγγας και του υλοποιημένου περιβάλλοντος της επιφάνειας. Παραδοσιακά, η πληροφορία για τον σχεδιασμό και την κατασκευή μίας τέτοιας υπερκατασκευής, είναι διαθέσιμη ως ατομικά, ανεξάρτητα, και ετερογενή δεδομένα με αποτέλεσμα να είναι κατά ελάχιστο βαθμό συνδεδεμένα με την υλοποίηση του έργου στην πράξη. Συνεπώς, εγκυμονεί κίνδυνος να λαμβάνονται μονόπλευρης σκοπιάς αποφάσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη όλα τα συσχετιζόμενα ζητήματα.

Η μέχρι τώρα έρευνα, έχει επικεντρωθεί σε αρκετά γενικές προσεγγίσεις της έννοιας ενός υπερσυστήματος μοντέλων ή αυτής των ενδοσυνδεδεμένων μοντέλων, τα οποία δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό σε έργα σηράγγων μέχρι στιγμής ή σε σημαντικά μοντέλα σχεδιασμού σηράγγων. Βάσει αυτών, αποκλειστικά και μόνο καλύπτονται μερικές από τις συνολικές απαιτήσεις του έργου. Στο παρόν κείμενο αναπτύσσεται ένα πλαίσιο εργασίας TIM προσομοιώματος, κυρίως ενσωματώνοντας αποσυνδεδεμένα μοντέλα, ανά περιπτώσεις διερεύνησης, καθώς και παρουσιάζεται η επίδοση των συνδεδεμένων δεδομένων του μοντέλου.

Λόγω της χαρακτηριστικής επίδρασης των μοντέλων αυτών τόσο στον σχεδιασμό, όσο και στην κατασκευαστική διαδικασία, δημιουργούνται τα ατομικά μοντέλα: εδάφους, μηχανήματος διάνοιξης TBM, διανοιγόμενης σήραγγας και υλοποιημένου επιφανειακού περιβάλλοντος, τα οποία στην συνέχεια συνενώνονται και συνδέονται κατάλληλα προς ανάλυση. Ακόμη, βάσει του προτεινόμενου πλαισίου εργασίας, παρουσιάζονται μελέτες περιπτώσιολογίας ώστε να εγκριθούν οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα της παραπάνω διαδικασίας.

Στα πλαίσια της εφαρμογής της μεθόδου αυτής, για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, υλοποιείται μία διαδικασία παραμετροποίησης των κύριων χαρακτηριστικών της διαδικασίας διάνοιξης στο περιβάλλον DYNAMO. Μέσω του DYNAMO, παράγονται κατάλληλα αρχεία εισόδου για το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στο τελευταίο, πραγματοποιείται πλήρης προσομοίωση και ανάλυση και διεξάγονται και συγκρίνονται περιπτώσιολογικές μελέτες, ενός τμήματος της υφιστάμενης υπόγειας σήραγγας, της επέκτασης

της γραμμής 3 του έργου του μετρό, του Νομού Αττικής, έργο που είναι υπό την επίβλεψη του φορέα Αττικό Μετρό ΑΕ, εν εξελίξει, μέχρι και την παρούσα συγγραφή (Σχ. 6.1).

ABSTRACT

In this thesis, the complex issue of designing and constructing underground tunnels by means of mechanized tunneling is examined within the remit of parametric modelling of the information related to the construction project. This method is called Tunnel Information Modelling (TIM) and tends to become more and more widespread due to the fluency it seems to offer in civil engineering.

A clear, holistic and detailed design of systems and processes in projects such as mechanized tunnelling is an essential element for a robust, low risk and low hazard, construction. In this context, the complex interactions between the ground, the boring machine (TBM), the segmented tunnel and the implemented surface built environment provide a significant contribution and influence. To this point, the information for the design and construction of such hyperstructures has been available as individual, independent, and heterogeneous data, resulting in a minimal degree of linkage to the project implementation in practice. Therefore there is a risk of making one-sided decisions that do not take into account all the interrelated issues.

Existing investigations have focused on fairly general approaches to the concept of a multisystem model or interconnected models, which have not been largely used in tunnel projects or in major tunnel design models, so far. On this basis, only some of the overall project requirements are covered. In this paper a TIM simulation working framework is developed, mainly incorporating interlinked models. Moreover their linked data performance is presented per stimulation cases.

Due to the characteristic influence of these models on both the design and the construction process, the individual models: Soil model, TBM boring machine model, segmented tunnel lining model and surface built environment model are created, which are then merged and linked appropriately for analysis. Furthermore, based on the proposed working framework, case studies are presented to approve the potential and advantages of the above process.

In this work, a digital workflow is implemented using the graphical programming environment DYNAMO that parametrically generates input files for the finite element solver ABAQUS. Next, case studies are carried out and compared, for a section of the existing underground tunnel of line 3 extension of the metro project in the Prefecture of Attica. This project is in progress up to the present writing under the supervision of the operator Attiko Metro SA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Λόγω της διαρκούς εξάπλωσης των αστικών περιοχών παγκοσμίως και της συνεχώς αυξανόμενης τάσης δημιουργίας νέων αναγκών και απαιτήσεων, δημιουργήθηκε η ανάγκη να βρεθούν βιώσιμες λύσεις αποδοτικού σχεδιασμού και κατασκευής, αντίστοιχων τεχνολογιών και κατασκευών, συνοδευόμενες από περιβαλλοντικά φιλικές και εναρμονισμένες δράσεις. Σε ότι αφορά την πρόκληση της συνεχούς ανάπτυξης των κυκλοφοριακών απαιτήσεων, μία εκ των επιλογών, είναι η επέκταση του συστήματος υπόγειας κυκλοφορίας και μεταφοράς με όδευση σηράγγων. Η λειτουργικότητα, η βιωσιμότητα και η οικονομία στη σχεδίαση και την κατασκευή των σηράγγων απαιτούν αξιόπιστη και έγκυρη γνώση σχετικά με τις αναμενόμενες επιδράσεις της κατασκευαστικής μεθόδου υλοποίησης, στο υφιστάμενο περιβάλλον.

Στο πλαίσιο αυτό, είναι απαραίτητη η εισχώρηση στην πληροφορία της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των γεωλογικών συνθηκών, των υφιστάμενων κατασκευών, κυρίως των άμεσα επηρεαζόμενων, καθώς και της διαδικασίας προόδου διάνοιξης και υλοποίησης της σήραγγας. Η μηχανοποιημένη σήραγγα είναι πλέον μία καθιερωμένη, ευέλικτη και οικονομική κατασκευαστική μέθοδος σε ότι αφορά τις υπόγειες υπερκατασκευές και χαρακτηρίζεται από τη χρήση ογκωδών μηχανημάτων διάνοιξης, της τάξεως, έως και 19.25m σε διάμετρο, καθώς και από ένα συνεχώς αναπτυσσόμενο φάσμα περιβαλλόντων εφαρμοσιμότητας.

Η διαδικασία κατασκευής, η οποία διέπεται από την διάνοιξη μέσω του μηχανήματος TBM (Tunnel boring machine), ενός υπερμηχανήματος διάνοιξης, εμπεριέχει την έννοια του ρίσκου που συσχετίζεται με ποικίλους παράγοντες, όπως οι καθιζήσεις της επιφάνειας του εδάφους, η σταθερότητα της διεπιφάνειας εδάφους και διατομής μετώπου διάνοιξης, το προς ενεμάτωση κενό που δημιουργείται κατά τη διάνοιξη και που όπως έχει αποδειχθεί τις επηρεάζει σημαντικά κ.α. Το κατασκευαστικό ρίσκο είναι ένας συνδυασμός όλων των προαναφερθέντων παραγόντων. Αυτό σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση τους και η απόκριση τους πρέπει να προσομοιωθούν και να διερευνηθούν τόσο κατά την φάση σχεδιασμού όσο και κατά την φάση κατασκευής του έργου και γενικότερα καθ' όλον τον κύκλο ζωής του. Συνεπώς, οι εποπτευόμενες αλληλεπιδράσεις των λειτουργιών του μηχανήματος με το έδαφος, η τοπογραφία και ορισμένες πρωταρχικές διαδικασίες διερεύνησης είναι σημαντικές διαδικασίες, ιδιαίτερα σε πιο δύσκολες καταστάσεις όπως η απομάκρυνση ενδεχόμενων εμποδίων ή οι περιπτώσεις διάνοιξης υπό μεγάλης σπουδαιότητας υφιστάμενου περιβάλλοντος, της επιφάνειας.

Επομένως, η κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος του έργου με τις αλληλοεπιδράσεις που συμβαίνουν μεταξύ του εδάφους, του μηχανήματος διάνοιξης (TBM), του συστήματος της σήραγγας και του υφιστάμενου περιβάλλοντος στην επιφάνεια, κατέχουν κομβικό ρόλο στην επιτυχή ολοκλήρωση του έργου.

Τον πλήρη σχεδιασμό και την παρακολούθηση της αλληλοσυσχέτισης αυτών των παραγόντων, επιτρέπουν απεικονίσεις και αριθμητικές αναλύσεις διαστάσεων και

τριδιάστατων υπολογιστικών μοντέλων, εύρους επιπέδου λεπτομέρειας (LoDs) και πληροφορίας, μέσω της εφαρμογής της μεθόδου TIM μοντελοποίησης. Η μέθοδος αυτή αφορά την διαδραστική συσχέτιση και αλληλεξάρτηση ατομικών ενδοσυνδεδεμένων μοντέλων (interlinked models), διαφορετικών πτυχών. Τα μοντέλα αυτά, υπολογίζουν με αξιοπιστία και ακρίβεια καθώς και τίθενται σε θέση, να προβλέπουν, την απόκριση του εδάφους κατά την διεργασία της διάνοιξης και έχουν στόχο την μείωση της διακινδύνευσης της εν λόγω υπερκατασκευής.

Η ιδέα αυτή βασίστηκε και αποτελεί εξέλιξη των μοντέλων πληροφορίας κατασκευών που συνιστούν την μέθοδο BIM (Building Information Modelling) μοντελοποίησης, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η ενεργοποίηση και η διαχείριση μίας τρισδιάστατης απεικόνισης φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών, μίας κατασκευής, από το στάδιο του σχεδιασμού της, έως και καθ' όλη την διάρκεια ζωής της.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η ευρύτερη έννοια της μηχανοποιημένης σήραγγας (mechanized tunneling) αποτελεί την τεχνολογία σχεδιασμού και κατασκευής μίας υπόγειας υπερκατασκευής. Συγκαταλέγεται στα έργα συγκοινωνιακών δομών, με στόχο, πέραν της διευκόλυνσης των μετακινήσεων και της συμβολής στην αντιμετώπιση κυκλοφοριακών ζητημάτων, των αστικών πόλεων, την μείωση του θορύβου (ηχορύπανση), του επιπέδου του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και των ενεργειακών καταναλώσεων. Η ως άνω τεχνολογία, ωστόσο, συνοδεύεται από πολυπλοκότητα συσχέτισης και αλληλοεπίδρασης, μεταξύ του δομικού μηχανήματος διάνοιξης (TBM), του εδάφους και του υφιστάμενου περιβάλλοντος κατασκευών (built-environment). Ακόμη, η υπάρχουσα πληροφορία, σε ότι αφορά αυτή την κατηγορία υπερκατασκευών, αποτελείται από ανεξάρτητες διεργασίες, είναι διασκορπισμένη και χαρακτηρίζεται από ετερογένεια. Αυτό οδηγεί σε μη δυνατότητα ολοκληρωμένης εποπτείας από τον μηχανικό και σε δυσκολίες σε επίπεδο λήψης αποφάσεων, που συχνά δεν συμπεριλαμβάνουν όλη την συσχετιζόμενη πληροφορία.

Ωστόσο, εμφανίζεται μία συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής, η οποία οφείλεται στην δυναμική, τεχνολογική πρόοδο της επιστήμης, του δομικού μηχανήματος διάνοιξης σηράγγων, καθώς και στην αποσαφήνιση, κατά το δυνατό, του τρόπου αλληλοεπίδρασης του με το υπέδαφος και όλων των παρελκόμενων της, επί παραδείγματι την επιρροή στις υφιστάμενες επιφανειακές κατασκευές. Ευνοϊκό στοιχείο της ανάπτυξης της αποτελεί επίσης, η δυνατότητα εφαρμοσιμότητάς της σε ποικίλες εδαφικές συνθήκες.

Δεδομένου του γεγονότος ότι το έργο αυτό απαιτεί από την αρχική φάση σχεδιασμού του έως και την φάση λειτουργίας του, τόσο την οργάνωση των πληροφοριών που το αφορούν όσο και αριθμητικές αναλύσεις διαφορετικών επιπέδων λεπτομέρειας του, η ανάγκη μίας πλατφόρμας συλλογής, σύνδεσης και αξιοποίησης πληροφοριών και αριθμητικών μοντέλων, για την εκτέλεση των ενεργειών αυτών είναι επιτακτική. Αυτή η ιδιαίτερη πλατφόρμα, δυνατότητας πολύπλοκων συσχετίσεων μεταξύ πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί, αξιολογηθεί, ταξινομηθεί

και οργανωθεί, καθώς και δημιουργίας και επιλύσεων αριθμητικών μοντέλων επιτυγχάνει την δημιουργία ομοιόμορφης πρόσβασης σε όλα τα συσχετιζόμενα δεδομένα που απαιτούνται για τον προγραμματισμό και την υλοποίηση του έργου. Παράλληλα, συμβάλλει σημαντικά στην βελτιστοποίηση σχεδιασμού και στην απόδοση αξιόπιστων αποτελεσμάτων και κατ' επέκταση στη δυνατότητα προβλέψεων, προς όφελος της μείωσης του ρίσκου με ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού ασφάλειας. Σε αντίθεση με ένα BIM μοντέλο, αυτή η προσέγγιση λαμβάνει υπόψη και δεδομένα δυναμικά και χωροχρονικά εξαρτώμενα.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής, η δημιουργία μιας συνολικής πλατφόρμας, δεν είναι εφικτή, ωστόσο η διαδικασία που ακολουθείται πλησιάζει αρκετά στην έννοια και την φιλοσοφία αυτή. Μέσω της διαδικασίας αυτής προκύπτει ένα μέρος απαντήσεων στο ερώτημα του κατά πόσο είναι αποδοτική αυτή η προσέγγιση οργάνωσης, μοντελοποίησης και προσομοίωσης στον τομέα της μηχανοποιημένης σήραγγας. Η συνολική προσέγγιση προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προσομοίωσης μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η προσπάθεια μίας ακριβούς και πλήρους απεικόνισης, ανάλυσης και οιονεί βελτιστοποίησης της διαδικασίας της μεθόδου μηχανοποιημένης σήραγγας, ακόμη από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού της έως και την υλοποίηση και μετέπειτα την φάση λειτουργίας.

Το στάδιο προγραμματισμού και σχεδιασμού του έργου απαιτεί την ανάπτυξη, την απεικόνιση και την αριθμητική ανάλυση του μοντέλου, ενέργειες οι οποίες εκτελούνται βάσει της συλλογής παραμέτρων μέσω της επιπλέον συνεργασίας με εργαλεία όπως τα GIS.

Στόχος λοιπόν της εργασίας είναι η δημιουργία ενός πολυπαραμετρικού μοντέλου προσομοίωσης, πολύπλοκων αλληλοσυσχετίσεων και αλληλοεπιδράσεων, στα πλαίσια της μεθόδου BIM μοντελοποίησης, προσανατολισμένο στην μέθοδο της μηχανοποιημένης σήραγγας (TIM). Στη συνέχεια το μοντέλο αυτό αναλύεται και προκύπτουν οι επιδιωκόμενοι στόχοι και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

1.3 Ερευνητικοί στόχοι

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η ανάπτυξη ενός πλήρους, ακριβούς και αξιόπιστου παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας και προσομοίωσης, του έργου της μηχανοποιημένης σήραγγας με την μέθοδο TIM μοντελοποίησης. Το μοντέλο αυτό τίθεται σε θέση, έπειτα από ανάλυση, να αποδίδει καθιζήσεις, συγκεκριμένων επιφανειών και σημείων εποπτείας, με την παράλληλη ανάδειξη αυτοματοποιημένων διαδικασιών, σε στάδιο σχεδιασμού, για το οποίο προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν αφορούν κυρίως τη διαδικασία κατασκευής και την αλληλεπίδραση αυτής με το έδαφος. Ο χαρακτήρας της εργασίας προσανατολίζεται στη διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι σύγχρονες υπολογιστικές δομές, καθώς και μέσω αυτών, στο να θίξει και να ασχοληθεί με ένα μεγάλο εύρος παραγόντων και ζητημάτων που αποτελούν την συνολική διαδικασία του έργου και του τρόπου προσέγγισής της, συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη κατανόηση της μεθόδου που εφαρμόζεται και στην διεξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων για διάφορους τομείς ενδιαφέροντος.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου πληροφορίας και προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα πραγματικά σχέδια οριζοντιογραφίας, μηκοτομής και λεπτομερειών, του έργου του μετρό του Νομού Αττικής, από τα οποία επιλέχθηκε ένα τμήμα προς μελέτη μήκους περίπου 200m (το ακριβές μήκος είναι 194.1m) της περιοχής της Νίκαιας. Για λόγους εχεμύθειας τα συγκεκριμένα σχέδια δεν επισυνάπτονται στο κείμενο της εργασίας.

Μέχρι και σήμερα, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά εκτενείς διερευνήσεις σε ότι αφορά την σήραγγα ως κατασκευή και δομή και το μηχάνημα διάνοιξης. Μέσω αυτών έχουν προκύψει άκρως σημαντικά δεδομένα του βαθμού επιρροής τους στις παραμορφώσεις του εδάφους, τιθέμενα σε αλληλεπίδραση με αυτό. Το έδαφος όμως είναι ένας πιο απρόβλεπτος παράγοντας καθώς διακατέχεται από ποικιλία στρωματογραφίας, η οποία με τη σειρά της χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια και μη γραμμικότητα, οι οποίες μπορεί να συμβαίνουν σε πολύ μικρό χώρο εξάπλωσης εντός της εδαφικής μάζας.

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στον ρόλο του εδάφους και το κατά πόσο επηρεάζει τα αποτελέσματα των καθιζήσεων, συγκεκριμένων επιφανειών και σημείων εποπτείας, με την εξέταση παραλλαγών του σε σχέση με τις συνθήκες γεωμετρίας και των ιδιοτήτων που επικρατούν στην κάθε περίπτωση.

1.4 Μεθοδολογία

Τα υπάρχοντα συστήματα οργάνωσης δεδομένων για την διάνοιξη σηράγγων, σχεδιάζονται να αποθηκεύουν και να οργανώνουν ακατέργαστα δεδομένα τα οποία έχουν συσσωρευτεί από προηγούμενα έργα διάνοιξης σηράγγων. Καθώς τα δεδομένα αυτά δίνονται κυρίως σε μορφή απλού κειμένου ή σε υπολογιστικά φύλλα, ως διαγράμματα και εικόνες, είναι δύσκολο να ερμηνευθούν χωρίς κάποιο επαρκές τρισδιάστατο ή τετραδιάστατο μοντέλο απεικόνισης. Επιπλέον δεν παρέχεται καμία ολοκληρωμένη και ολιστική προβολή της κατασκευαστικής διαδικασίας σε συνδυασμό με πλήθος επί τόπου μετρήσεων και προσομοιώσεων. Σε ένα έργο διάνοιξης σήραγγας, όμως, είναι υψίστης σημασίας να υπάρχει μία συνεπής και ολοκληρωμένη στρατηγική οργάνωσης δεδομένων. Παρόλο που υπάρχουν ήδη μέθοδοι για την μοντελοποίηση του εδάφους ή της σήραγγας, η μοντελοποίηση αυτή συχνά βασίζεται σε ξεχωριστά, ανεξάρτητα μοντέλα τα οποία αναπαριστούν ορισμένα από τα ζητήματα της διαδικασίας διάνοιξης.

Για την μοντελοποίηση και την οργάνωση δεδομένων ενός ολόκληρου έργου διάνοιξης μιας σήραγγας η υπολογιστική και διαδραστική ζεύξη ατομικών μοντέλων είναι αναγκαία. Η μέθοδος BIM εφαρμόζεται ώστε να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο πληροφορίας.

Η διαδικασία αυτή σχετίζεται με την δημιουργία ενός εύρους διακύμανσης επιπέδου, πολυπαραμετρικού, πολυμορφικού σε επίπεδα κλίμακας και τύπου της πληροφορίας, μοντέλου προσομοίωσης, που επιτελεί πολύπλοκες αλληλοσυσχετίσεις και αναλύσεις. Το μοντέλο αυτό και η λειτουργία του, αποδίδει εκτιμήσεις και αποτελέσματα σε ότι αφορά τις υπόγειες κατασκευές και εγκαταστάσεις, στην προκειμένη περίπτωση της μηχανοποιημένης σήραγγας, υπό και παρά υφιστάμενης κατασκευαστικής δομής και κατάστασης.

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσεται κώδικας ανάδειξης των δυνατοτήτων της παραμετρικής προσομοίωσης και των αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Η σχεδίαση και απόδοση του μοντέλου προσομοιώματος της σήραγγας, πραγματοποιείται σε περιβάλλον Revit. Η πλήρης προσομοίωση και διαμόρφωση της γεωμετρίας, επιτυγχάνεται μέσω ενός εργαλείου του Revit, του Dynamo, το οποίο αποτελεί ένα περιβάλλον απεικόνισης (visual programming), που δίνει την δυνατότητα παραμετροποίησης του εκάστοτε προσομοιώματος και διατήρησης όλης της απαραίτητης δομικής πληροφορίας, με χρήση υπερσυνδεδεμένων δεδομένων. Έπειτα ακολουθεί, η χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων για την διακριτοποίηση και την ανάλυση του προσομοιώματος, για τον υπολογισμό των μεγθών στόχου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με το λογισμικό Abaqus.

Για την εξασφάλιση του βέλτιστου σχεδιασμού, είναι σημαντική η αξιολόγηση διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων. Η εκτίμηση της επίδρασης των εναλλακτικών αυτών λύσεων στην περιβάλλουσα κατάσταση αποτελεί ένα σύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα που απασχολεί ταυτοχρόνως αρκετούς τομείς.

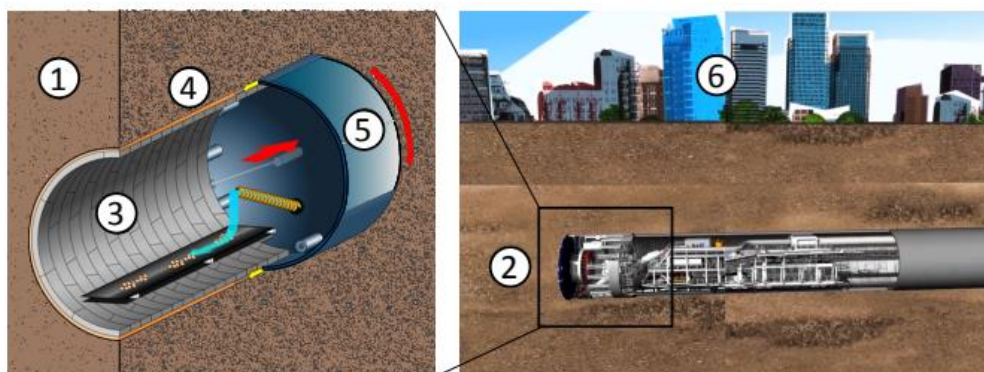
Η συγκεκριμένη εργασία αναλαμβάνει την αξιολόγηση εναλλακτικών περιπτώσεων και λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση του βάθους διάνοιξης της σήραγγας στις επιφανειακές καθιζήσεις για δύο περιπτώσεις, ήτοι για την περίπτωση του πραγματικού βάθους των 25m (υπερκάλυψη εδάφους) και την περίπτωση ρηχής σήραγγας, βάθους υπερκάλυψης 10m ιδίων συνθηκών. Για μία πιο ολοκληρωμένη άποψη δημιουργείται ένα ακόμη μοντέλο προσομοίωσης, μέσω της σύνδεσης τεσσάρων υπομοντέλων: του εδάφους, της σήραγγας και του περιβάλλοντος ενέματος, του μηχανήματος TBM και της υφιστάμενης δόμησης της επιφάνειας, με μία κατάλληλη διαμόρφωση του επιπέδου λεπτομέρειας για το καθένα, συγκρίνοντας επίσης τα αποτελέσματα των καθιζήσεων με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Όλα αυτά αφορούν ένα προσομοίωμα, που εφόσον έχει ως στόχο την διερεύνηση της επιρροής των διαφορετικών περιπτώσεων στην συνολική διαδικασία, αποτελείται από σταδιακή διάνοιξη, συνολικού αριθμού προόδου 10 (δέκα) βημάτων, με εγκατεστημένο σε κάθε βήμα διάνοιξης, το τμήμα της σήραγγας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σύνδεση των ατομικών μοντέλων, ιδίως του μοντέλου εδάφους με το μηχανήμα διάνοιξης TBM, η οποία διακατέχεται από ορισμένες παραδοχές που εξηγούνται κατά την φάση ανάλυσης του προσομοιώματος,.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Μηχανοποιημένη σήραγγα - Η έννοια του μοντέλου πληροφορίας

2.1 Μοντέλα πληροφορίας (Tunnel Information Modelling) (TIM)

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.1 η χρήση διαδικασιών TIM προσφέρει ταχύτητα, τόσο στο σχεδιαστικό και υπολογιστικό κομμάτι, όσο και σε επίπεδο λήψης αποφάσεων, σε συνδυασμό με πλήρη εποπτεία, ακρίβεια, αξιοπιστία και μείωση της διακινδύνευσης. Ακόμη προσφέρει εφεδρεία πληροφορίας, προσβάσιμη, για μελλοντική ύπαρξη βάσης δεδομένων.

Η συνολική διαδικασία αφορά την δημιουργία ενός πολυπαραμετρικού μοντέλου (Σχ. 2.1), εύρους διακύμανσης επιπέδων κλίμακας, λεπτομέρειας, τύπου και μορφής πληροφοριών, για την προσομοίωση της διαδικασίας διάνοιξης της μηχανοποιημένης σήραγγας εντός του αστικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας τις παραμετρικές δυνατότητες των εργαλείων της μεθόδου BIM, πιο συγκεκριμένα του αντιπροσωπευτικού παραμετρικού περιβάλλοντος Revit και του εργαλείου του, Dynamo ως βάση της συνολικής ανάλυσης της κατασκευής.



Σχ. 2.1: Πολυπαραμετρικό μοντέλο κύριων συστατικών μηχανοποιημένης σήραγγας σε αστικά περιβάλλοντα: 1) Περιβάλλον έδαφος, 2) Λεπτομέρεια σήραγγας και διανοιγόμενης επιφάνειας, 3) Τεμάχια δακτυλίων της σήραγγας, 4) Ένεμα κενού διάνοιξης, 5) Μηχάνημα διάνοιξης (TBM), 6) Υφιστάμενη δόμηση.

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται για κάθε συστατικό στοιχείο του συστήματος της κατασκευής παραμετρικές απεικονίσεις για τρία επίπεδα λεπτομέρειας (χαμηλό, μεσαίο και υψηλό) ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο και αποτέλεσμα, οι οποίες χρησιμοποιούνται και συμβάλλουν στην μετέπειτα αυτοματοποιημένη εκτέλεση των διαδικασιών των αριθμητικών μοντέλων και στην εκτενέστερη μελέτη και κατανόηση της αλληλεπίδρασης της κατασκευαστικής διαδικασίας με το έδαφος.

Η διαδικασία αυτή μέσω των συγκεκριμένων εργαλείων προσφέρει περισσότερη ευελιξία στον χρήστη όπως τη δυνατότητα εναλλαγής καμπύλων ευθυγραμμιών της γεωμετρίας της σήραγγας με μικρό αριθμό ενεργειών. Ακόμη το σώμα και η προγραμματιστική δομή της σήραγγας είναι βασισμένη σε ήδη ορισμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, κατηγορίας οικογενειών, που περιλαμβάνουν τα αντίστοιχα κατασκευαστικά στοιχεία. Η κατηγοριοποίηση αυτή διευρύνεται για όλες τις κατασκευαστικές απαιτήσεις και τα στοιχεία της διαδικασίας, προσφέροντας τη δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης. Το γεγονός αυτό καθιστά τον σχεδιασμό περισσότερο σταθερό, αξιόπιστο και ασφαλή, με δυνατότητες βελτιστοποίησης.

Κατά συνέπεια, μεγάλο πλήθος δεδομένων συγκεντρώνεται και συμμετέχει σε διενεργούμενες διαδικασίες, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που έχουν συγκεντρωθεί πριν και κατά τον σχεδιασμό, αλλά και κατά την διάνοιξη, μέσω επί τόπου μετρήσεων. Τα δεδομένα αυτά, συναλλάσσονται μέσω εναλλαγών σε όρους τύπου, κλίμακας, μορφής και φάσης εντός του κύκλου ζωής του έργου. Ακόμη, ενώ μερικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της κατασκευαστικής συμπεριφοράς του μηχανήματος, της διαδικασίας διάνοιξης και του εδάφους, κάποια άλλα σχετίζονται με το υπολογιστικό κομμάτι της διαδικασίας διάνοιξης (τύπος δεδομένων). Οι διαφορές στην κλίμακα του μοντέλου οφείλονται στην ευκρίνεια των δεδομένων σε όρους χώρου και χρόνου. Για παράδειγμα, από την μία πλευρά, διεισδυτικά μοντέλα εύρους κλιμάκωσης μεγεθών, απαιτούν δεδομένα με χωρική και χρονική ευκρίνεια για μεγέθη σε μονάδες μικρομέτρων και δευτερολέπτων αντίστοιχα, ενώ από την άλλη, τα υπολογιστικά μοντέλα αφορούν εκατοστά/μέτρα και ώρες/ημέρες (κλίμακα δεδομένων). Επιπλέον, τα δεδομένα ίσως είναι διαθέσιμα με διαφορετική μορφή ή ίσως προέρχονται από διασκορπισμένες πηγές όπως κείμενα, σχέδια, υπολογιστικά φύλλα, διαγράμματα ή ακόμη είναι διαθέσιμα σε μέρη πολύπλοκων τρισδιάστατων μοντέλων (μορφή δεδομένων).

Σημαντικό είναι, να αναγνωρίζονται οι φάσεις του κύκλου ζωής του έργου κατά τις οποίες τα δεδομένα δημιουργήθηκαν και να διατηρούνται, καθώς και να χρησιμοποιούνται ώστε να γίνονται εκτιμήσεις που αφορούν την αξιοπιστία ή την αβεβαιότητα του περιεχομένου τους. Για να γίνει χρήση και ανάλυση αυτής της ποικιλίας δεδομένων κατά τρόπο, τόσο αποδοτικό όσο και πρακτικό, απαιτείται ένα συνολικό και ολιστικού χαρακτήρα, μοντέλο πληροφορίας. Συνεπώς οι λογισμικές εφαρμογές είναι αναγκαίο να συλλέγουν τα απαιτούμενα δεδομένα αυτόματα, αποδοτικά και με σωστό τύπο, κλίμακα και μορφή από το μοντέλο πληροφορίας.

Τέλος ένα επιπλέον πλεονέκτημα ενός τέτοιου μοντέλου είναι η ικανότητά του να παρέχει τετραδιάστατες απεικονίσεις συσχέτισης αποθηκευμένων δεδομένων μέσω της χωροχρονικής τους χαρτογράφησης.

2.1.1 Μοντέλο πληροφορίας κατασκευών (BIM)

Το μοντέλο πληροφορίας κατασκευών (Building Information Model, BIM) είναι μία επικαιροποιημένη σύλληψη μοντελοποίησης, που περιλαμβάνει την διενέργεια και την οργάνωση μίας τρισδιάστατης ψηφιακής αναπαράστασης, φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου προς κατασκευή, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Τα

BIM μοντέλα συνήθως χρησιμοποιούνται ως φορείς κοινόχρηστων δεδομένων και πηγών γνώσης σε ότι αφορά τον προγραμματισμό, την υλοποίηση, την οργάνωση, την αξιοποίηση, την αναβίωση ακόμη και τις ενέργειες κατεδάφισης. Η κεντρική ιδέα είναι η δημιουργία ενός μοντέλου που να περιέχει και να συνδέει όλη τη σχετική πληροφορία των δεδομένων του έργου η οποία αποθηκεύεται σε υπομοντέλα.

Παρόλο που η σύλληψη της μεθόδου BIM εφαρμόζεται σε έργα κατασκευής κτιρίων κατά κύριο λόγο, σε πολλούς άλλους κατασκευαστικούς τομείς θεωρείται κατάλληλη στο να παρέχει μία μεθοδολογία ορισμού μοντέλων πληροφορίας και στο να υποστηρίζει σημαντικά συνεκτικές ανταλλαγές με χρήση προτύπων, πλαισίων ανταλλαγής, όπως τα IFC (Industry Foundations Classes). Τα πρότυπα IFC βασίζονται σε μοντέλα δεδομένων αντικειμενοστραφούς προέλευσης και για αυτό τον λόγο είναι αρκετά προσαρμοστικά και ευκόλως επεκτάσιμα. Η χρήση προτύπων πλαισίων ανταλλαγής είναι χρήσιμη κυρίως στην φάση σχεδιασμού όπου αρκετοί συμμετέχοντες στο έργο πρέπει να δουλέψουν συγχρόνως αντιμετωπίζοντας διαφορετικά ζητήματα του έργου. Η πληροφορία τότε μπορεί να ανταλλαχθεί και εναλλαχθεί γρήγορα και ομοιόμορφα. Ωστόσο, οι δυνατότητες αναπαράστασης χρησιμοποιώντας την μέθοδο BIM δημιουργούν πολύπλοκες σχέσεις στο να αναγνωριστούν εύκολα.

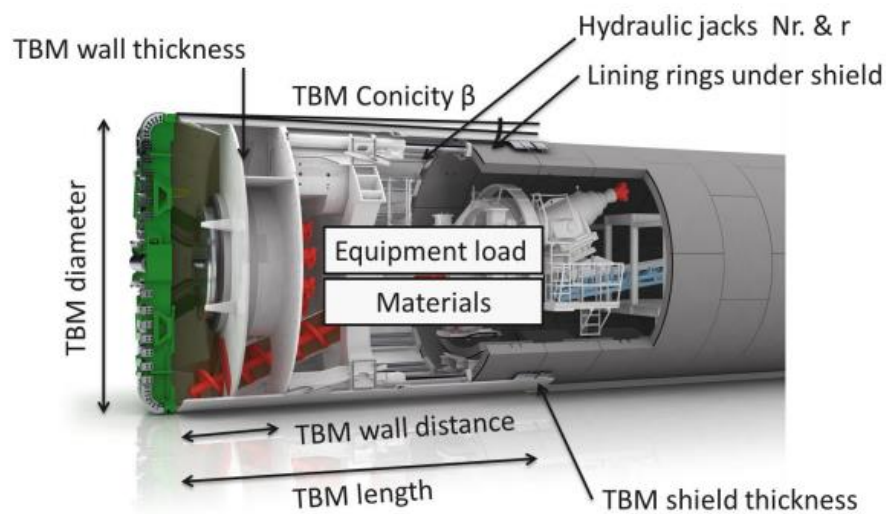
2.2 Διαδικασία διάνοιξης σήραγγων - Δομικό μηχάνημα TBM

Το μηχάνημα TBM είναι ένα υπερμηχάνημα πολλαπλών δυνατοτήτων και αποτελεί το μέσο διάνοιξης στις μηχανοποιημένες σήραγγες, ανάμεσα σε ποικιλία στρωματογραφίας από χαλαρά εδάφη έως και σκληρά πετρώματα. Η διάνοιξη πραγματοποιείται μέσω της κυκλικής διατομής του μετώπου κοπής που περιλαμβάνει στο μπροστινό τμήμα του. Μέχρι σήμερα, το δυνατό εύρος διαμέτρων της διατομής κοπής του μηχανήματος είναι από 1m (micro-TBMs) έως και τα 19.25m. Σε χαλαρές εδαφικές αποθέσεις υπάρχουν τρεις τύποι μηχανημάτων διάνοιξης: τα μηχανήματα πίεσης συγκράτησης γαιών (EPB, earth pressure balance machines), τα μηχανήματα ασπίδας κατάλληλα για χαλαρές εδαφικές αποθέσεις (SS, slurry shield machines) και τα μηχανήματα ανοιχτού μετώπου.

Σε ότι αφορά τους δύο τύπους των κλειστών μηχανημάτων, λειτουργούν ως μηχανήματα ενιαίας θωράκισης μέσω μίας μεταλλικής κυλινδρικής ασπίδας. Η προοδευτική εμπρόσθια προώθησή τους συμβαίνει πιέζοντας κατάλληλα, μέσω ειδικών κατασκευαστικών ωθητικών διατάξεων υδραυλικών γρύλων, το πλέον εγκατεστημένο τμήμα της σήραγγας. Στην διαδικασία διάνοιξης μέσω μηχανήματος με ασπίδα, το μηχάνημα ωθεί και ωθείται μέσω της επιμήκυνσης υδραυλικών γρύλων εκσκάπτοντας το έδαφος μέσω της περιστρεφόμενης κεφαλής κοπής που διαθέτει. Η κεφαλή του μηχανήματος TBM μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εκάστοτε διάνοιξη, ενώ ο εφεδρικός εξοπλισμός συνήθως είναι ο ίδιος.

Το βήμα προόδου διάνοιξης αντιστοιχεί σε μήκος, όσο το μέσο μήκος ενός δακτυλίου σήραγγας που συναρμολογείται εντός της ασπίδας πριν την απελευθέρωση, την εγκατάσταση και την ανάθεσή του ως έδραση για την δυνατότητα επόμενης μήκυνσης των γρύλων. Η διαδικασία αυτή συνοδεύεται από στάση του μηχανήματος μέχρι την σύνδεση του νέου δακτυλίου με το

υπόλοιπο τμήμα της σήραγγας. Συγχρόνως εγχέεται ένεμα τσιμεντοκονίας στον δακτυλιοειδές δημιουργούμενο κενό που συμβαίνει λόγω της κωνικότητας της ασπίδας. Για την αποτροπή εισχώρησης εδαφικού υλικού εντός της σήραγγας και για τον περιορισμό της παραμόρφωσης του εδάφους λόγω της διατάραξης που υφίσταται, λαμβάνονται επιπλέον μέτρα βοηθητικής υποστήριξης.



Σχ. 2.2: Κόρια χαρακτηριστικά του μηχανήματος διάνοιξης

Οι διαστάσεις του μηχανήματος διάνοιξης (TBM) δεν συμβαδίζουν πλήρως με τον εκσκαπτόμενο όγκο και το αποτόπωμα της διάνοιξης που δημιουργεί το μέτωπο κοπής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται κενό μεταξύ του απαραμόρφωτου εδάφους και της ασπίδας, στα πλαίσια της δυνατότητας επίτευξης καλύτερου ελέγχου της κίνησης του μηχανήματος, προς μείωση των ωθητικών δυνάμεων των γρύλων και του μήκους της ασπίδας. Αυτό το κενό ονομάζεται κενό καθοδήγησης και δημιουργείται λόγω του κωνικού σχήματος της κυλινδρικής ασπίδας μέσω της διαφοράς διατομής μεταξύ αρχής και τέλους της. Η κατά μήκος κλίση λόγω της διαφοράς αυτής κυμαίνεται τυπικά από 1-4% οδηγώντας σε μία αυξανόμενη επιφάνεια κενού με κατεύθυνση προς το τέλος της ασπίδας (Σχ. 2.2). Κατά συνέπεια το περιβάλλον έδαφος μπορεί να παραμορφωθεί έως ότου μερικώς αποκτήσει επαφή και κατ' επέκταση αναπτύσσει τριβή με το μηχάνημα. Η τριβή αυτή ωστόσο δεν είναι σημαντική καθώς η διεπιφάνεια της ασπίδας λιπαίνεται. Επιπλέον της χαλάρωσης και διατάραξης της άμεσα επηρεαζόμενης επιφάνειας

εδάφους εντός του κενού, η επιφάνεια αυτή καθίσταται υπό επιρροή του βάρους του μηχανήματος και της παραμόρφωσης της ασπίδας όταν υπόκειται σε εδαφική πίεση.

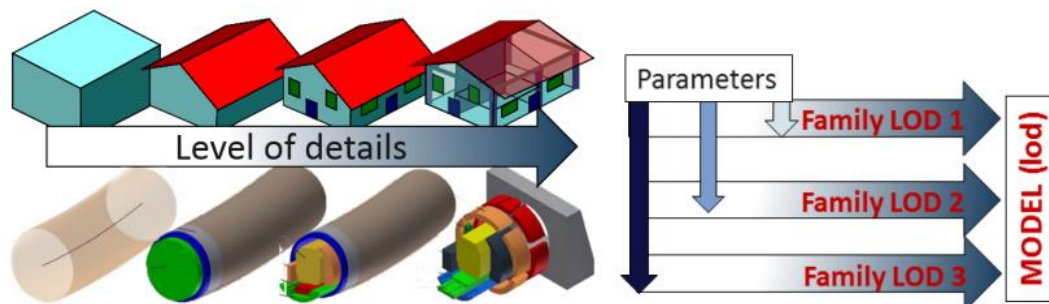
Η διαδικασία διάνοιξης σε χαλαρά εδάφη όπως η κορεσμένη άργιλος, προκαλεί μικρού μεγέθους αλλά μεγάλου χρονικού εύρους καθιζήσεις. Αυτό συμβαίνει καθώς διαταράσσεται το παρθένο έδαφος και το γεωστατικό προφίλ των τάσεων που επικρατεί, με πιθανή ταυτόχρονη μεταβολή των συνθηκών υπερπίεσης των πόρων. Οι παράγοντες της έγχυσης ενέματος και της πίεσης που αναπτύσσεται στη διανοιγόμενη διεπιφάνεια αναπτύσσουν σημαντική αλληλεπίδραση με τον άμεσα επηρεαζόμενο εδαφικό σκελετό και επηρεάζουν την εξέλιξη της μεταβολής της υπερπίεσης των πόρων. Επιπλέον, η ανάπτυξη της διάνοιξης από το μηχάνημα TBM σε χαλαρά κορεσμένα εδάφη προϋποθέτει την προσωρινή υποστήριξη του περιβάλλοντος εδάφους, την επίτευξη στεγανότητας και την αποτροπή της εισροής του νερού στο εσωτερικό του μηχανήματος και της κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ανάπτυξη του παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας σε περιβάλλον Revit

3.1 Αναφορά στα επίπεδα λεπτομέρειας προσομοίωσης (LoDs)

Η αντιμετώπιση της διαδικασίας προσομοίωσης του έργου μηχανοποιημένης σήραγγας, σήμερα, στερείται ευελιξίας και η υπολογιστική διαδικασία που την διέπει απαιτεί χρόνο και επιφέρει αυξημένο υπολογιστικό φορτίο. Προς μείωση αυτών, συχνά η διαδικασία καταλήγει σε λιγότερο βέλτιστες αποδόσεις και πιθανώς σε αποτελέσματα που να μην είναι ιδανικά για τις επικρατούσες συνθήκες. Για την εξασφάλιση μιας συνεχόμενης ροής εργασίας, οι παράγοντες του υπολογιστικού χρόνου και φορτίου πρέπει να μειωθούν. Στην φάση σύλληψης της ιδέας του σχεδιασμού, ο εκάστοτε σχεδιαστής χρειάζεται μόνο προσεγγιστικές εκτιμήσεις για τα διάφορα υπό εξέταση σενάρια. Ωστόσο, αν η ανάλυση σε στάδιο προμελέτης λαμβάνει υπ' όψιν αβεβαιότητες και δεικνύει πιθανούς κινδύνους, απαιτείται μία πιο λεπτομερής κατάρτιση του μοντέλου. Συμπερασματικά, ο στόχος που καλείται το μοντέλο να εξυπηρετήσει, επιβάλλει και το ανάλογο επίπεδο λεπτομέρειας που θα το χαρακτηρίζει.

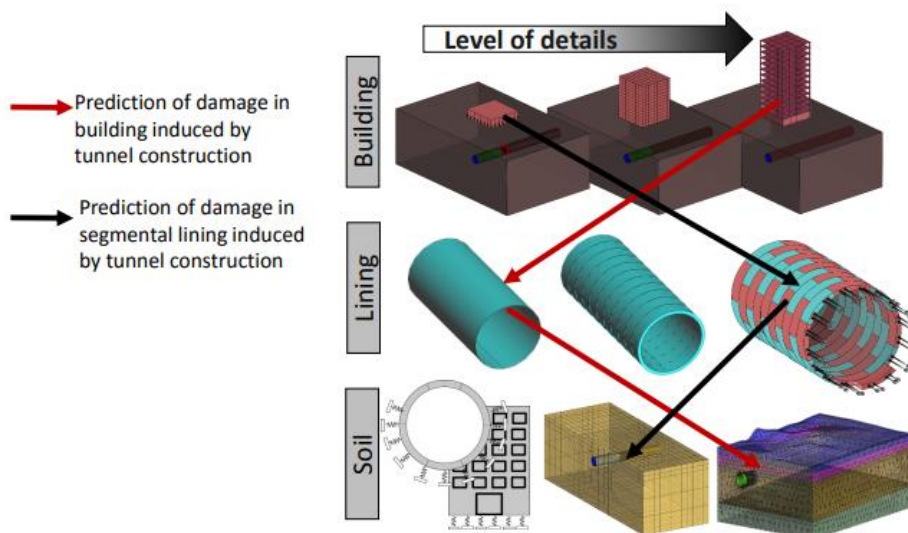
Η έννοια των διαφορετικών επιπέδων λεπτομέρειας στην προσομοίωση του μοντέλου και η ύπαρξή τους σε αυτό δίνει στον χρήστη, την δυνατότητα εναλλαγής τους, με προσθήκες ή αφαιρέσεις αντίστοιχα, για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων στόχων. Η διάκριση των επιπέδων λεπτομέρειας γίνεται ανάμεσα σε χαμηλό, μεσαίο και υψηλό. Το χαμηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD1) δεν εμπεριέχει την έννοια του όγκου στα στοιχεία του συστήματος προσομοίωσης. Το μεσαίο επίπεδο (LoD2) περιέχει την έννοια του όγκου και την γεωμετρική αναπαράσταση αυτής, αλλά οι υπόλοιπες γεωμετρικές διατάξεις είναι απλουστευμένες. Το υψηλό επίπεδο (LoD3) περιέχει πληροφορίες και λεπτομέρειες για την ακριβή γεωμετρία του κάθε συστατικού στοιχείου του συστήματος (Σχ. 3.1).



Σχ. 3.1: Αριστερά: Επίπεδα λεπτομέρειας απεικόνισης των γεωμετριών, Δεξιά: Αντιστοιχία παραμέτρων ανά επίπεδο λεπτομέρειας

Το περιβάλλον σχεδιασμού και ανάλυσης, στο οποίο συμβαίνουν οι εναλλαγές των επιπέδων λεπτομέρειας επιτρέπει στον χρήστη να ελιχθεί για οποιεσδήποτε αλλαγές, χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο υπάρχον προσομοίωμα. Στο σημείο αυτό παρατίθεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, προς κατανόηση της έννοιας του συνακόλουθου απαραίτητου επιπέδου λεπτομέρειας προς εξυπηρέτηση του σκοπού διαφορετικών ζητημάτων, του ίδιου μοντέλου. Η μείωση του επιπέδου του ρίσκου σχετικά με τις βλάβες στην υφιστάμενη δόμηση, ως επίδραση της κατασκευής του έργου της υπόγειας σήραγγας, απαιτεί υψηλό βαθμό λεπτομέρειας σε ότι αφορά το δομημένο περιβάλλον και την τοπολογία στην οποία εδράζεται και από την οποία άμεσα επηρεάζεται, ενώ η σήραγγα ανταπεξέρχεται ως προσομοίωση με χαμηλότερο επίπεδο λεπτομέρειας. Από την άλλη πλευρά, η εκτίμηση και ο υπολογισμός των επιβαλλόμενων τάσεων στην σήραγγα, προϋποθέτει υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας προσομοίωσης της σήραγγας και της διαδικασίας διάνοιξης, ενώ στην δόμηση αντιστοιχεί το χαμηλό επίπεδο, με την τοπολογία της επιφάνειας να επιδρά αμελητέα στην ακρίβεια και την μεταβολή των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων (Σχ. 3.2).

Ο ρόλος λοιπόν της έννοιας του επιπέδου λεπτομέρειας προσομοίωσης είναι να αποδώσει ακριβή και ουσιαστικά αποτελέσματα για το εκάστοτε κυρίαρχο ζήτημα προς επίλυση σε συνδυασμό με την μείωση του υπολογιστικού φορτίου και χρόνου.



Σχ. 3.2: Περιπτώσεις εναλλακτικών συνδυασμών μεταξύ των επιπέδων λεπτομέρειας (LoDs) ανεξάρτητων υποκατάστατων μοντέλων ανάλογα με τον επιδιωκόμενο στόχο της ανάλυσης

3.2 Παραμετρικό μοντέλο πληροφορίας της σήραγγας (lining information model)

Η σχεδίαση και η απόδοση των προσομοιωμάτων που συνιστούν το παραμετρικό μοντέλο πληροφορίας, πραγματοποιούνται στο περιβάλλον Revit. Το Revit είναι ένα λογισμικό κατάλληλο για την εφαρμογή της μεθόδου BIM μοντελοποίησης και περιλαμβάνει λειτουργίες και χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικού και ηλεκτρομηχανολογικού σχεδιασμού. Στο περιβάλλον αυτό υπάρχει η δυνατότητα ορισμού έτοιμων προσαρμοσμένων οικογενειών, κατασκευαστικών συστατικών στοιχείων. Πρακτικά οι οικογένειες αυτές περιέχουν κατασκευαστικά στοιχεία πρότυπων και τυπικών διαστάσεων, η διαμόρφωσή των οποίων είναι επίσης τυπική και κοινή στον κτιριακό σχεδιασμό και έχουν δημιουργηθεί μέσω υποδειγμάτων οικογενειών (family templates) τα οποία παρέχει το Revit. Μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες του είναι η δυνατότητα ορισμού παραμετρικών οικογενειών, παραδείγματος χάρη η ανάθεση κοινών ιδιοτήτων, γεωμετρικών και υλικού, ως παραμέτρους, οι οποίοι είναι επεξεργάσιμοι από το μοντέλο πληροφορίας. Ακόμη έχει δυνατότητες χρήσης υπερσυνδεδεμένων δεδομένων και συσχέτισης της συνολικής διαδικασίας με τον παράγοντα του χρόνου, γεγονός που το καθιστά περιβάλλον τετραδιάστατης σχεδίασης και απεικόνισης.

Η πλήρης προσομοίωση και διαμόρφωση της γεωμετρίας της σήραγγας αλλά και της οντότητας της, επιτυγχάνεται μέσω ενός εργαλείου του Revit, το Dynamo. Το Dynamo επεκτείνει τις δυνατότητες της μεθόδου BIM με τα δεδομένα και το λογικό περιβάλλον ενός επεξεργαστή αλγοριθμικών γραφικών. Η ευελιξία του σε συνδυασμό με μία ισχυρή βάση δεδομένων του Revit προσφέρει μία νέα προοπτική της μεθόδου BIM. Αποτελεί ένα περιβάλλον προγραμματισμού μέσω κειμένων και εντολών γλώσσας προγραμματισμού (DesignScripts) και απεικόνισης (visual programming) τόσο της διαδικασίας κωδικοποίησης όσο και του αποτελέσματός της. Το DesignScript έχει δυνατότητες δυναμικής επεξεργασίας και συσχέτισης των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί.

Μέσω εντολών μορφής κωδικοποιημένου πλαισίου (code blocks) δίνει την δυνατότητα παραμετροποίησης και διατήρησης όλης της απαραίτητης δομικής πληροφορίας, έχοντας την συνολική εποπτεία του προσομοιώματος. Τα πλαίσια αυτά συνδέονται μεταξύ τους, τρέχοντας διεργασίες και μεταφέροντας την πληροφορία. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα ομαδοποίησης τους (Groups), προς εποπτική διευκόλυνση τόσο της διαδικασίας, όσο και τις εύρεσης πιθανών σφαλμάτων.

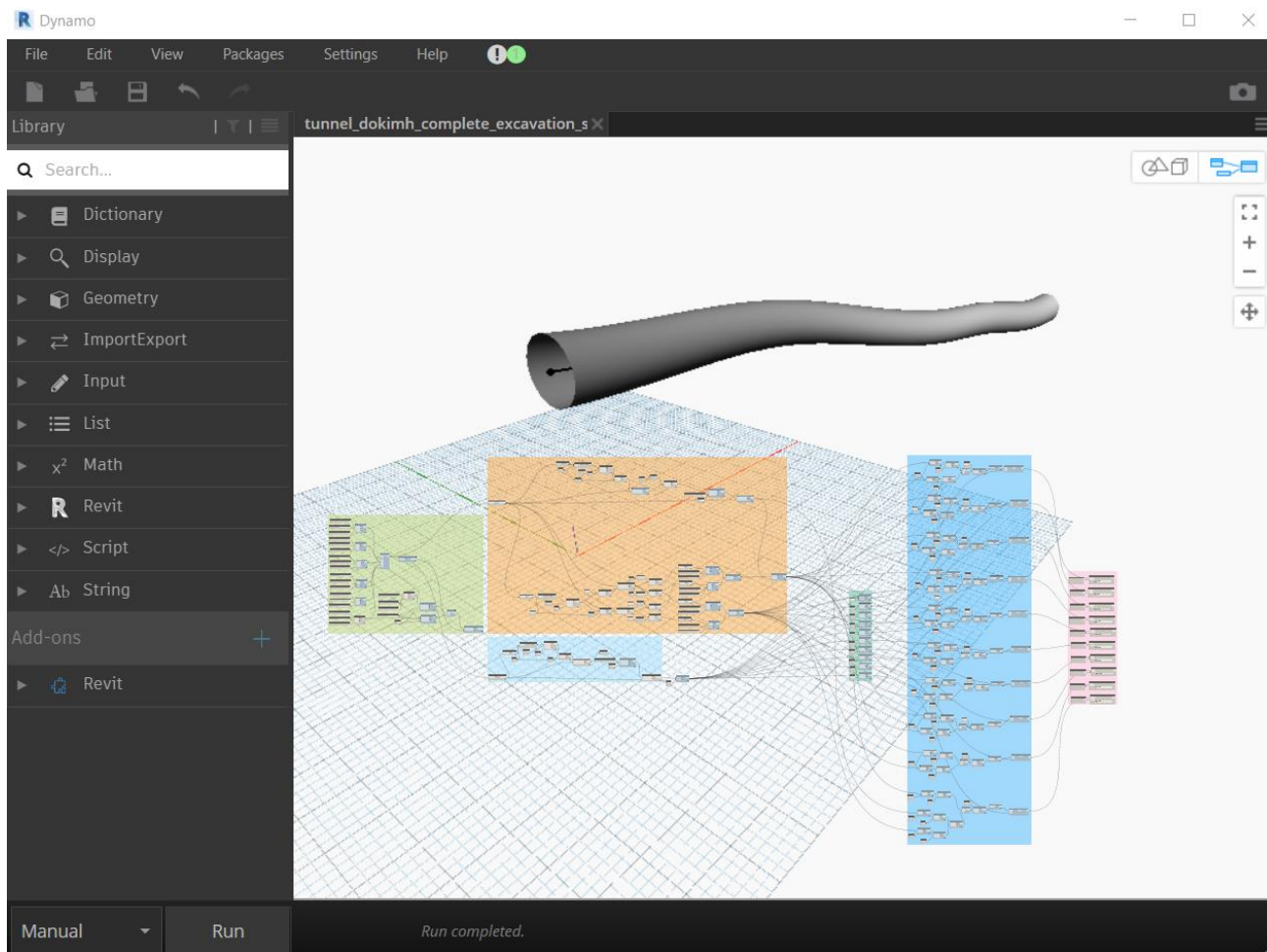
Μία άλλη πλεονεκτική λειτουργία του είναι η γραφή με γλώσσα προγραμματισμού υπό μορφή Python η οποία προσφέρει πιο αποδοτικές μεθόδους γραφής συνθηκών και επανάληψης, καθώς και άλλες λειτουργίες όπως η γραφή αλγορίθμων στους προσαρμοσμένους κόμβους για την δημιουργία και ενεργοποίηση του μοντέλου.

Τέλος ιδιαίτερα ευνοϊκό είναι το γεγονός ότι το Dynamo έχει διττό χαρακτήρα υποστηρίζοντας ένα περιβάλλον οπτικού προγραμματισμού με την δυνατότητα της εναλλαγής από τον κώδικα στην απεικόνιση και της επικοινωνίας αυτών, εμφανούς οπτικά, καθώς η επιλογή πλαισίων στον κώδικα εμφανίζει την απεικόνιση στην οποία αντιστοιχούν, στο πίσω

φόντο, το οποίο είναι επίσης επεξεργάσιμο σε ότι αφορά τον τρόπο απεικόνισης και εποπτείας. Οι δυνατότητες τρισδιάστατης περιστροφής, μεγέθυνσης/σμίκρυνσης και «επισκεψιμότητας» στο εσωτερικό σώμα στερεών απεικονίσεων είναι μερικές από αυτές (Σχ. 3.3).

Η κατασκευαστική μορφή της σήραγγας αποτελεί την μόνιμη υποστήριξή της. Οι δακτύλιοι της σήραγγας, κατάλληλης διάταξης προκατασκευασμένων στοιχείων/τεμαχίων (segments), αυξάνουν ως κατασκευαστική μέθοδος, την ταχύτητα της συνολικής διαδικασίας διάνοιξης. Αποτελούν επίσης μέρος της προοδευτικής ανάπτυξης της διάνοιξης καθώς κατάλληλες μηχανικές διατάξεις υδραυλικών γρύλων χρησιμοποιούν το σώμα της σήραγγας και τους εγκατεστημένους δακτυλίους ώστε να στηριχθούν και να ασκήσουν ωθητικές δυνάμεις σε αυτούς, για την επίτευξη της κοπής και της συγκράτησης των γαιών, αλλά και της μη εκτροπής της πορείας του μηχανήματος.

Το διανοιγόμενο κενό μεταξύ της σήραγγας και του εδάφους που δημιουργείται λόγω της κωνικότητας της ασπίδας, συνεχώς, γεμίζει με ένεμα ώστε να αποφευχθούν οι μετατοπίσεις των εδαφικών μαζών προς την θέση εγκατάστασης των προκατασκευασμένων τεμαχίων, που συνθέτουν τους δακτυλίους, σταθεροποιώντας την μόνιμη κατασκευή.

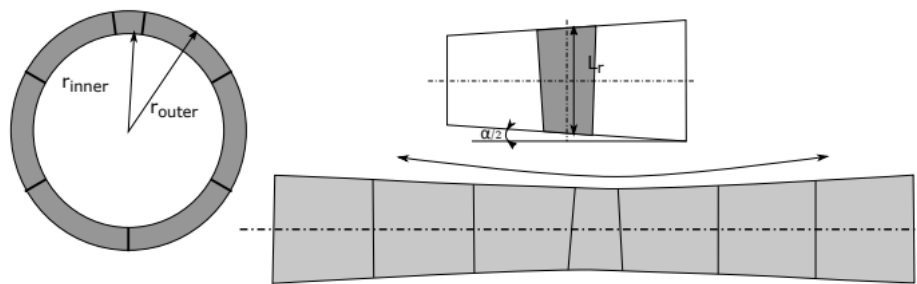


Σχ. 3.3: Περιβάλλον *Dynamo* – Κώδικας και παραμετρική απεικόνιση της σήραγγας

Ένας πλήρης δακτύλιος προκατασκευασμένων τμημάτων έχει χαρακτηριστικά κωνοειδούς γεωμετρίας ώστε να προσαρμόζεται σε καμπύλες ευθυγραμμίες με ακτίνες καμπυλότητας έως και 150m. Το στενότερο και μικρότερο σε διαστάσεις προκατασκευασμένο τεμάχιο, η λεγόμενη «κλείδα/σφήνα» αποτελεί το τελευταίο τμήμα που εγκαθίσταται και συμπληρώνει τον δακτύλιο. Το τεμάχιο αυτό προσαρμόζεται με τα γειτονικά του μέσω συστημάτων αυλακώσεων και προεξοχών ή οπών και βυσμάτων.

Όπως προαναφέρθηκε κάθε δακτύλιος αποτελείται από έξι προκατασκευασμένα τεμάχια σκυροδέματος ίσου μήκους και ένα μικρότερον διαστάσεων το οποίο τοποθετείται τελευταίο και σφραγίζει το σύστημα του. Οι κατά μήκος πλευρές των δακτυλίων μετά την τοποθέτηση των προκατασκευασμένων τμημάτων δεν προκύπτουν παράλληλες, αλλά εμφανίζουν μία γωνία η οποία επιτρέπει και εφαρμόζει την εκτροπή από την ευθυγραμμία. Η γωνία αυτή βασίζεται στο σχήμα του κάθε τεμαχίου και την θέση τοποθέτησής του, συγκριτικά με μία βέλτιστη περιστροφή του δακτυλίου σε σχέση με το προηγούμενο και το επόμενο του.

Ο κάθε δακτύλιος χαρακτηρίζεται από τις εξής παραμέτρους: το μέσο μήκος πλευρών L_r , κατά μήκος της καμπύλης ευθυγραμμίας, την εσωτερική και εξωτερική διάμετρο του δαχτυλιδιού ($r_{inner/outer}$), την γωνία α με την οποία αποκτά το χαρακτηριστικό της κωνικότητας, τον αριθμό των προκατασκευασμένων τμημάτων και τον τρόπο διαχωρισμού και τοποθέτησης τους στο δακτύλιο. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν τον καθολικό δακτύλιο της σήραγγας (Σχ. 3.4).



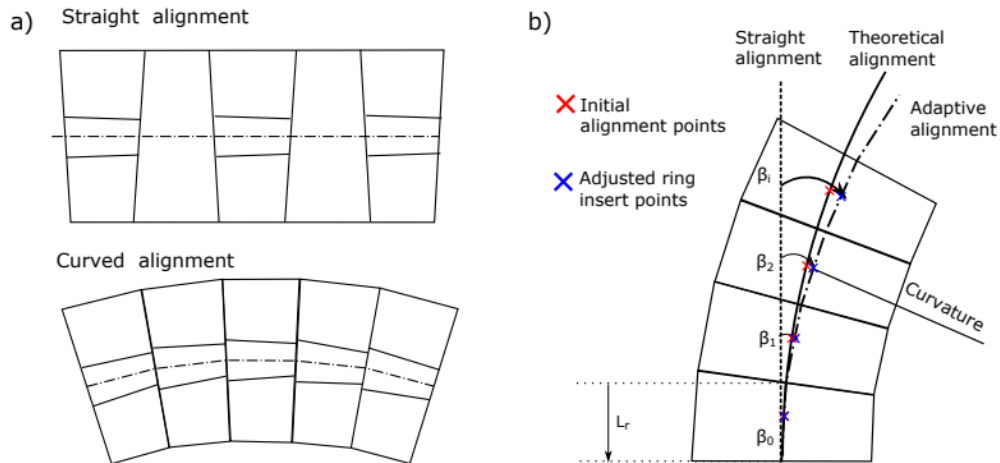
Σχ. 3.4: Κωνοειδής γεωμετρία του καθολικού δακτυλίου

Η καμπύλη ευθυγραμμία της σήραγγας παρακολουθείται με μικρές αποκλίσεις από τους εν σειρά συναρμοσμένους δακτυλίους, μέσω κατάλληλων, βέλτιστων σχετικών περιστροφών τους. Για την επίτευξη μίας καθαρά ευθύγραμμης πορείας τα δαχτυλίδια προσανατολίζονται έτσι, ώστε το τμήμα κλειδί να βρίσκεται εναλλάξ άνω και κάτω, δηλαδή αντιδιαμετρικά του προηγούμενου και του επόμενου του. Στις καμπύλες ευθυγραμμίες το τμήμα κλειδί βρίσκεται σε κάθε βήμα στο πάνω μέρος. Λόγω της τοποθέτησης αυτής και της κωνικότητας των δακτυλίων επιτυγχάνεται η εκτροπή από την ευθυγραμμία (Σχ. 3.5).

Οι βασικοί παράμετροι της διαδικασίας προσαρμογής στην ευθυγραμμία της σήραγγας είναι οι εξής: Η πραγματική χάραξη της πορείας της μέσω των σχεδίων οριζοντιογραφίας, το μέσο μήκος πλευρών L_r του δακτυλίου, η καμπυλότητα κ των καμπύλων τμημάτων της οριζοντιογραφίας και η γωνία σχηματισμού κωνικότητας α . Τις τρεις τελευταίες παραμέτρους συνδέει η εξής σχέση:

$$\alpha = \arccos \frac{1 - L_r^2}{2 \cdot \kappa^2}$$

Ο ακριβής αλγόριθμος υπολογισμού της βέλτιστης θέσης των δακτυλίων και κατ' επέκταση τοποθέτησης των επιμέρους τεμαχίων τους, για την προσέγγιση της πραγματικής, θεωρητικής καμπύλης ευθυγραμμίας της σήραγγας, πραγματοποιείται με την δυνατότητα Python script του Dynamo. Ο αλγόριθμος είναι βασισμένος σε μία λίστα αρχικών κεντρικών σημείων θεωρητικής τοποθέτησης των δακτυλιδιών στην θεωρητική καμπύλη ευθυγραμμία της σήραγγας και στις παραμέτρους L_r και κ των δακτυλιδιών, από τις οποίες προκύπτει η γωνία α .



Σχ. 3.5: Διαμόρφωση της ευθυγραμμίας της σήραγγας βάσει του καθολικού δακτυλίου – a) Ευθεία και καμπύλη ευθυγραμμία, b) Προσαρμογή στην καμπύλη ευθυγραμμία σχεδιασμού

Διαμορφώνεται μία νέα λίστα σημείων, τα οποία προκύπτουν μέσω περιστροφής των δακτυλιδιών, περί ενός επιπέδου κάθετου στην διάμετρό τους, τέτοια ώστε τα τελικά αποδιδόμενα κεντρικά σημεία τους να απέχουν την ελάχιστη απόσταση από τα αρχικά θεωρητικά. Τα νέα σημεία και οι γωνίες περιστροφής των δακτυλιδιών αποθηκεύονται σε λίστες ως εξαγόμενα δεδομένα (output data). Ο αλγόριθμος αυτός αφορά την περιστροφή των δακτυλιδιών σε δισδιάστατο επίπεδο καθώς οι εναλλακτικές περιστροφές είναι μόνο δύο, 0 ή 180 μοίρες, για να διαμορφωθεί καμπύλη ή ευθεία γεωμετρία αντίστοιχα, δηλαδή συμβαίνουν περιστροφές δεξιόστροφες ή αριστερόστροφες ούτως ώστε τα διαδοχικά δακτυλίδια να έρθουν σε επαφή με όσο το δυνατό καλύτερη προσαρμογή στην θεωρητική ευθυγραμμία.

Ωστόσο η σήραγγα αφορά τρισδιάστατη απεικόνιση οπότε το αποτέλεσμα της περιστροφής των δακτυλιδιών πρέπει να αφορά επίσης δυνατότητες τριών διαστάσεων. Η θέση λοιπόν των προκατασκευασμένων τεμαχίων σε κάθε δακτυλίδι παραλληλίζεται με μία νοητή περιστροφή

του. Τα τεμάχια λοιπόν είναι αυτά που καθορίζουν τον αριθμό πιθανών περιστροφών για την ακόμη πιο ακριβή προσαρμογή στην ευθυγραμμία. Για την επίτευξη προσαρμογής σε τρεις διαστάσεις λοιπόν, απαιτείται και γίνεται η προσθήκη μίας ακόμη παραμέτρου, της μεταβλητής θ , η οποία καλύπτει την περιστροφή σε επίπεδο παράλληλο της διαμέτρου του κάθε δαχτυλιδιού. Για τον λόγο αυτό, αν η τμηματοποίηση του δαχτυλιδιού σε αριθμό είναι $b+1$ υπάρχουν b (έξι) πιθανές περιστροφές με $\Delta\theta=60$ μοίρες ($360/6$).

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές στρατηγικές προσέγγισης του ζητήματος των περιστροφών. Η μία αφορά την περιστροφή κατά ένα $\Delta\theta$, ωρολογιακά ή αντιωρολογιακά, του επόμενου διαδοχικού δαχτυλιδιού. Εναλλακτικά συμβαίνει η περιστροφή του σε όποια από τις έξι θέσεις, που αφορούν την επαφή του με το προηγούμενο, είναι η κατάλληλη για καλύτερη προσαρμογή. Για το παρακολούθημα της 3D θεωρητικής ευθυγραμμίας, σχετικά με τις περιστροφές των δακτυλίων, το τυπολόγιο και η στρατηγική του αλγορίθμου είναι η εξής:

Ξεκινώντας από τον αρχικό δακτύλιο και τις αρχικές συντεταγμένες του κεντρικού σημείου από το οποίο παρεμβάλλεται η θεωρητική καμπύλη ευθυγραμμία, προσθέτοντας έναν δακτύλιο αποκτούμε ένα νέο κεντρικό σημείο, της ευθυγραμμίας προς προσαρμογή με συγκεκριμένη διαφορική, σχετική μετατόπιση.

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x_n \quad y_n = y_{n-1} + \Delta y_n \quad z_n = z_{n-1} + \Delta z_n$$

Αυτή η διαφορική μετατόπιση εξαρτάται από τις γεωμετρικές παραμέτρους L_r και α , όπως ακριβώς και στην γωνία περιστροφής θ κατά τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta x_n = L_r \cdot \cos(\beta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_n) \cdot \cos(\gamma_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_n) \quad (2)$$

$$\Delta y_n = L_r \cdot \sin(\beta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_n) \cdot \cos(\gamma_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_n) \quad (3)$$

$$\Delta z_n = L_r L_r \cdot \cos(\beta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_n) \cdot \sin(\gamma_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_n)$$

Μέσω αυτών των σχέσεων αποκτούμε μία νέα κλίση των δαχτυλιδιών, β σε επίπεδο αναφοράς συντεταγμένων xy και γ σε επίπεδο yz .

$$\beta_{n+1} = \beta_n + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\theta_n)$$

$$\gamma_{n+1} = \gamma_n + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cdot \sin(\theta_n)$$

Τελικώς, έχοντας το αρχικό σημείο του δακτυλίου, υπολογίζεται το νέο κεντρικό σημείο του.

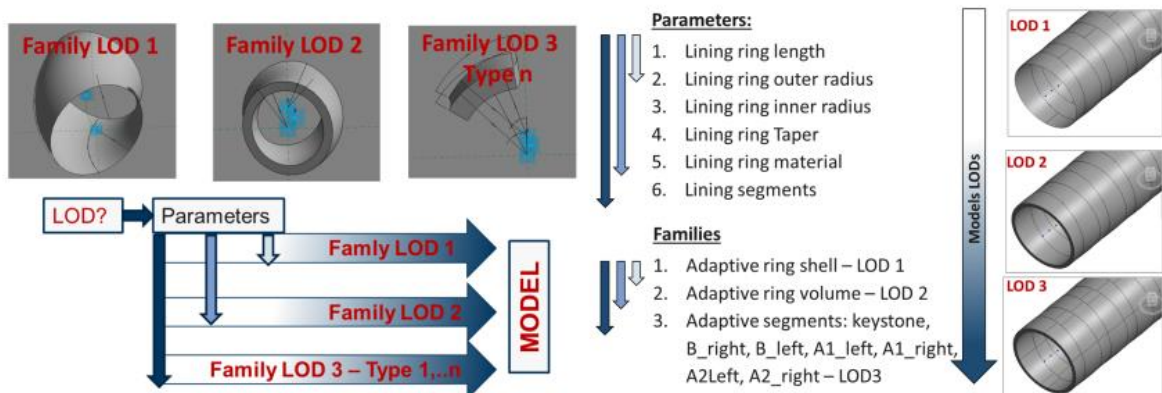
$$x_n^{mid} = x_n + \frac{L_r}{2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{4}\right) \cdot \cos\left(\beta_n + \frac{\alpha}{4} \cdot \cos(\theta^r)\right) \cdot \cos\left(\gamma_n + \frac{\alpha_n}{4} \cdot \sin(\theta_n)\right)$$

$$y_n^{mid} = y_n + \frac{L_r}{2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{4}\right) \cdot \sin\left(\beta_n + \frac{\alpha}{4} \cdot \cos(\theta^r)\right) \cdot \cos\left(\gamma_n + \frac{\alpha_n}{4} \cdot \sin(\theta_n)\right)$$

$$z_n^{mid} = y_n + \frac{L_r}{2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{4}\right) \cdot \cos\left(\beta_n + \frac{\alpha}{4} \cdot \cos(\theta^r)\right) \cdot \sin\left(\gamma_n + \frac{\alpha_n}{4} \cdot \sin(\theta_n)\right)$$

Έχοντας τον αλγόριθμο αυτόν μπορούμε να επιτύχουμε κάθε ίχνος της σήραγγας στο χώρο, χρησιμοποιώντας μόνο τον καθολικό δακτύλιο. Η συμφωνία της προσαρμοσμένης καμπύλης ευθυγραμμίας με την πραγματική θεωρητική, ωστόσο, δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας αυτής.

Σε ότι αφορά το κομμάτι της προσομοίωσης της σήραγγας και το επίπεδο λεπτομέρειας της, το χαμηλό επίπεδο περιλαμβάνει ως παράμετρο μόνο το μήκος της σήραγγας. Το μεσαίο επίπεδο περιλαμβάνει παραπάνω, τις παραμέτρους του υλικού, την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα της σήραγγας όπου έτσι το προσομοίωμα αποκτά όγκο και στοιχεία της γεωμετρίας και του σχήματος των δακτυλίων. Τέλος, το υψηλό επίπεδο περιλαμβάνει ακόμη παραπάνω τον αριθμό και την διάταξη των προκατασκευασμένων τεμαχίων στο κάθε δακτύλιο (Σχ. 3.6).



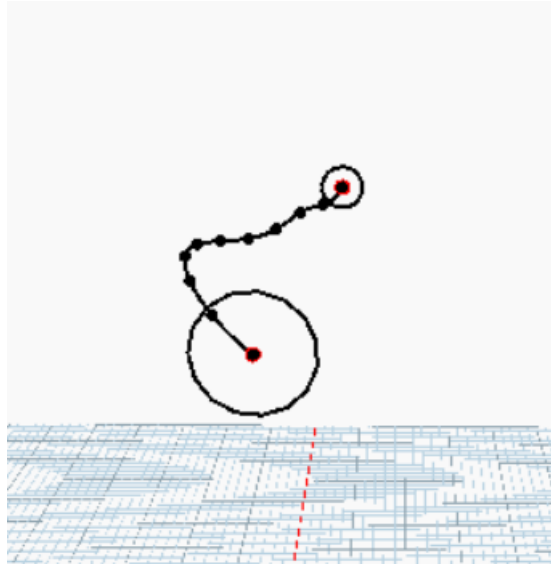
Σχ. 3.6: *Αριστερά:* Επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs) του μοντέλου πληροφορίας της σήραγγας, *Δεξιά:* Αντιστοιχία παραμέτρων και συστατικών μερών για κάθε επίπεδο λεπτομέρειας

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το μεσαίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD2) για την προσομοίωση της σήραγγας, καθώς τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα δεν αφορούν την

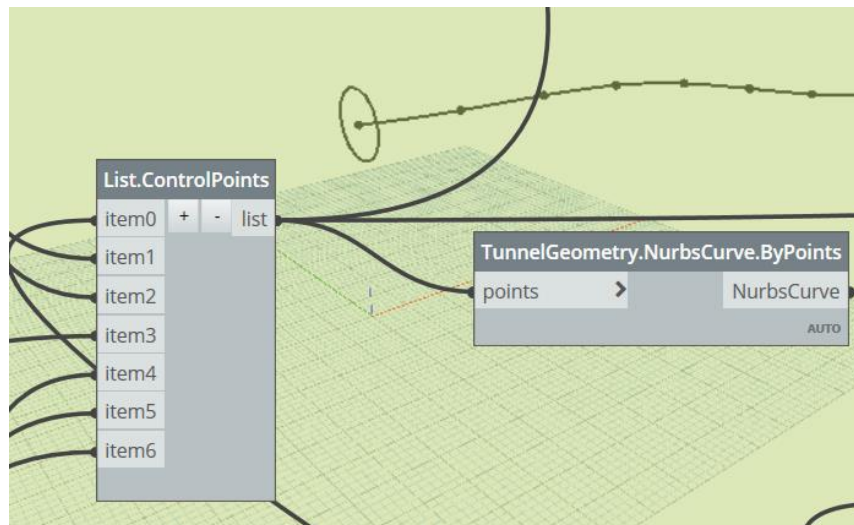
καταπόνηση του συστήματός της. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η διαμόρφωση της γεωμετρίας της. Δημιουργήθηκε ένας κώδικας (Dynamo script) με αρχικές παραμέτρους τις συντεταγμένες σημείων ελέγχου, κορυφών, της καμπύλης ευθυγραμμίας της σήραγγας και την εξωτερική ακτίνα της. Το script απέδωσε το κέλυφος της στο χώρο, δίνοντας οντότητα στην απεικόνιση του προσομοιώματος. Η καμπύλη αυτή προέκυψε από τον συνδυασμό σχεδίων οριζοντιογραφικής καμπύλης και μηκοτομής της σήραγγας, από τα οποία επιλέχθηκε να εξαχθεί συγκεκριμένο τμήμα αυτής, προς σχεδίαση και απεικόνιση, μήκους 200m.

Στο εν λόγω script δόθηκαν ως παράμετροι οι συντεταγμένες επτά σταθμισμένων σημείων ελέγχου από τα οποία παρεμβλήθηκε η καμπύλη που αναπαριστά την γεωμετρία της καμπύλης ευθυγραμμίας της σήραγγας (Σχ. 3.7). Η καμπύλη αυτή ονομάζεται NurbsCurve (Non Uniform Rational Basis Spline) και αποτελεί μια ιδιαίτερη μαθηματική εκπροσώπηση της σήραγγας, μεγάλης ακρίβειας, καθώς δεν αφορά μία απλή προσέγγιση αλλά μέσω της δυνατότητας μίας λείας απεικόνισης και ομαλής επεξεργασίας και προσαρμογής της, σε οποιοσδήποτε μικρομεταβολές, επιτυγχάνεται έως και πλήρης ταύτιση της γεωμετρίας. Οι μικρομεταβολές αυτές στον κώδικα του Dynamo αφορούν την αλλαγή των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου ή πιο επιστημονικά την αυξομείωση του βάρους τους (weighted control points). Όσο περισσότερο αυξάνεται το βάρος ενός σημείου, με την απομάκρυνσή του από την ευθυγραμμία, τόσο, κατ' αντιστοιχία, ελέγχει και έλκει προς το μέρος του την καμπύλη (Σχ. 3.8).

Οι δυνατότητες της καμπύλης αυτής, είναι αποτέλεσμα της μαθηματικής δομής της, καθώς αποτελείται από τις επιμέρους καμπύλες Splines, οι οποίες είναι τμηματικές πολυωνυμικές καμπύλες, διαφορετικού βαθμού οι οποίες παρεμβάλλονται μεταξύ σημείων, συνεχών διαστημάτων, συνθέτοντας έτσι μία γενικευμένη καμπύλη πολυωνυμικής παρεμβολής. Η γενικευμένη καμπύλη αυτή είναι σε θέση να παρακολουθήσει και να αποδώσει την λεία απεικόνιση οποιασδήποτε καμπύλης γεωμετρίας. Ο σχεδιασμός αυτός ονομάζεται καμπυλωτός (curved) και είναι κατάλληλος για οργανικές τρισδιάστατες (3D) μοντελοποιήσεις.



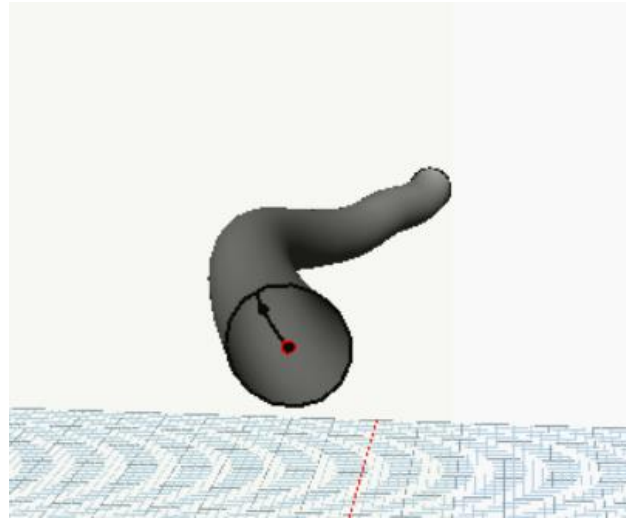
Σχ. 3.7: Απεικόνιση της γεωμετρίας (NurbsCurve) της καμπύλης εθνογραμμίας της σήραγγας



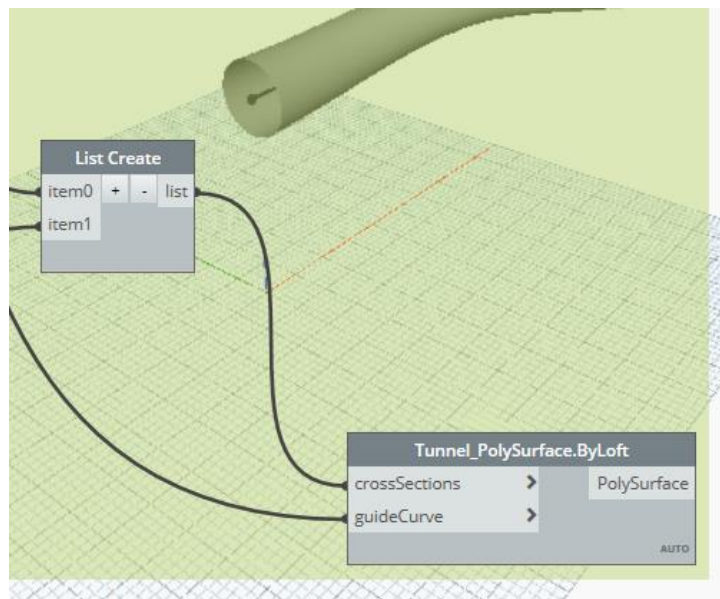
Σχ. 3.8: Κώδικας Dynamo script – Λίστα σταθμισμένων σημείων ελέγχου της καμπύλης γεωμετρίας της σήραγγας

Εκμεταλλεζόμενοι την ακριβή απόδοση της καμπύλης γεωμετρίας ως όδευση, η σήραγγα αποκτά την μορφή συνεχούς κελύφους (Shell element) (Σχ. 3.9) μεταξύ δύο κύκλων αρχής και

τέλους, δημιουργούμενοι με παράμετρο της διαμέτρου, την εξωτερική ακτίνα της σήραγγας (r_{outer}) (Σχ. 3.10).



Σχ. 3.9: Απεικόνιση της σήραγγας στον χώρο ως συνεχές κέλυφος



Σχ. 3.10: Κώδικας Dynamo script – Απόδοση συνεχούς κελύφους στη σήραγγα

Η σήραγγα επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ως τμηματικά συνεχές κέλυφος. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί, βάσει βιβλιογραφικής διερεύνησης, μία λογική προσέγγιση που δεν διαφοροποιεί κατά

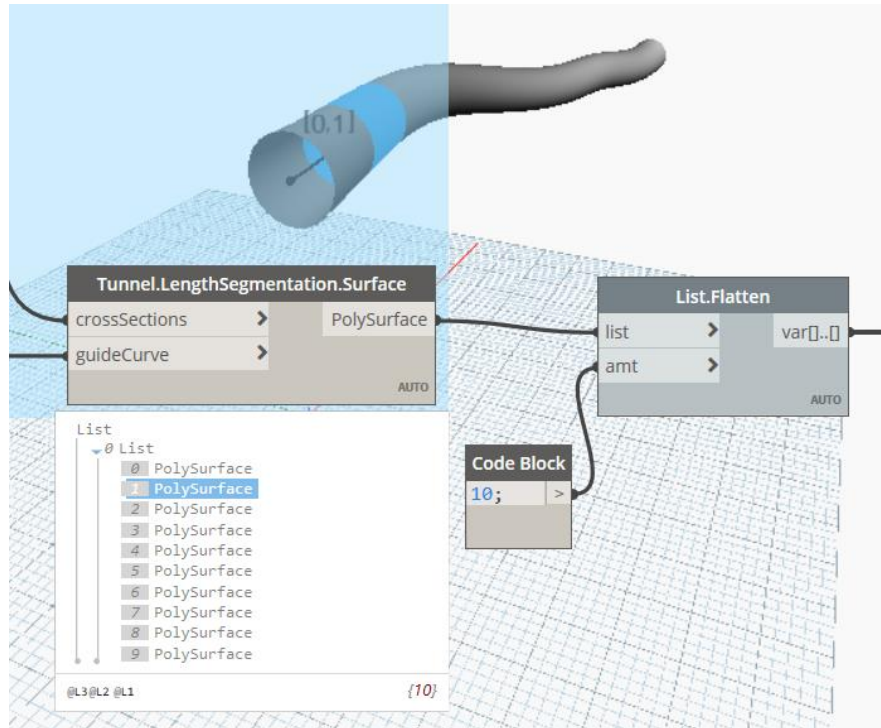
πολύ τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καθώς αυτά δεν επηρεάζονται από το επίπεδο λεπτομέρειας της σήραγγας. Το συνεχές αυτό κέλυφος τμηματοποιήθηκε σε 10 (δέκα) ισομήκη υποτμήματα κελύφους ώστε να προσομοιαστεί και να αναλυθεί μετ' έπειτα η προοδευτική διαδικασία διάνοιξης της σήραγγας. Το πραγματικό στάδιο διάνοιξης, όπως έχει προαναφερθεί, αφορά ανάλυση τμήματος, μεγέθους, ίσο με το μέσο μήκος πλευρών (L_r) του κάθε δακτυλίου προκατασκευασμένων στοιχείων (segments), άρα θα χρειαζόμασταν πολύ περισσότερα υποτμήματα για το παρόν μήκος. Ωστόσο προς μείωση του υπολογιστικού φορτίου και χρόνου της ανάλυσης, που δεν αποτελεί κομμάτι διερεύνησης της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η παραπάνω τμηματοποίηση.

Αποτέλεσμα της ως άνω διαδικασίας είναι η γεωμετρία 10 ισομηκών επιφανειών, συνεχούς κελύφους, οι οποίες αποθηκεύονται ως λίστα παραμέτρων output και συσχετίζονται κατάλληλα σε επόμενο βήμα με τις παραμέτρους των υπόλοιπων μοντέλων, προς απόδοση του αντίστοιχου κατάλληλου προσομοιώματος για το στάδιο της ανάλυσης και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στόχων (Σχ. 3.11). Το επίπεδο λεπτομέρειας της σήραγγας έπειτα από την προσομοίωση και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, είναι το μεσαίο (LoD2).

3.3 Παραμετρικό μοντέλο πληροφορίας εδάφους (Ground information model)

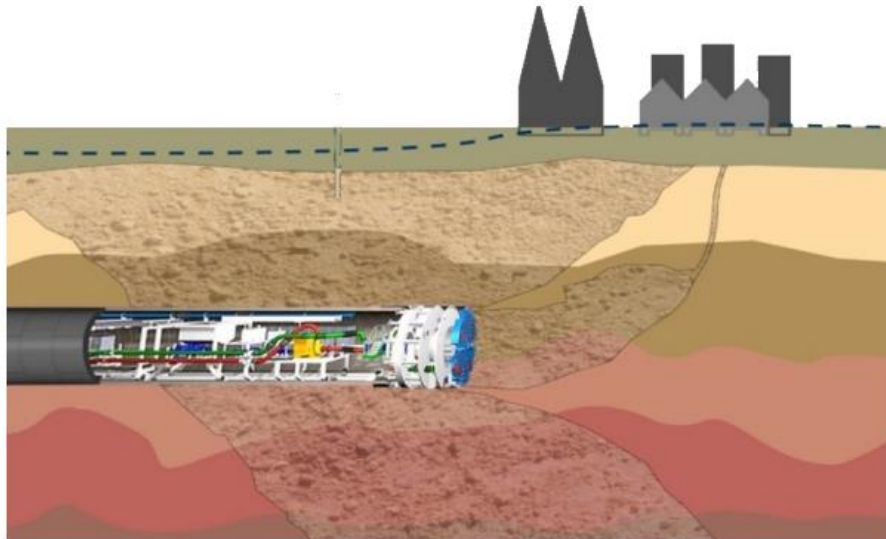
Στα έργα διάνοιξης σηράγγων συναντώνται πολύ συχνά αρκετά πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες. Είναι αρκετά σύνηθες, η διάνοιξη και κατασκευή της σήραγγας, να διεξάγεται ανάμεσα σε διαφορετικά στρώματα εδάφους, υπό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και εντός ενός γεωλογικού περιβάλλοντος που χαρακτηρίζεται από σχετική ανομοιογένεια ανά εδαφικό στρώμα (Σχ. 3.12). Έτσι λοιπόν η διαδικασία διάνοιξης χαρακτηρίζεται από πλήθος αβεβαιοτήτων. Το γεωλογικό υπόβαθρο επηρεάζει σχεδόν κάθε σημαντική απόφαση για τον προγραμματισμό, τον σχεδιασμό και την κατασκευή της σήραγγας, κατευθύνοντας τις μεταβολές του κόστους και την συνολική συμπεριφορά του έργου.

Οι συνθήκες του εδάφους αποσαφηνίζονται μέσω μελετών και διαδικασιών που βασίζονται σε γεωλογικές τομές εδάφους μέσω γεωτρήσεων, καθώς και σε επί τόπου διαγνώσεις και με τη βοήθεια της επιστήμης της τοπογραφίας βάσει των εκάστοτε τοπικών συνθηκών και αναγκών. Σήμερα, όλα αυτά τα δεδομένα που προκύπτουν αποθηκεύονται σε τρισδιάστατα μοντέλα συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας (3D GIS). Τα μοντέλα αυτά αποτελούν τρισδιάστατες απεικονίσεις του γεωλογικού σώματος, συμπεριλαμβάνοντας τον σχηματισμό των λίθων και την γεωλογική δομή γενικότερα.



Σχ. 3.11: Κώδικας *Dynamo script* – Απόδοση και απεικόνιση των 10 (δέκα) ισομηκών, τμημάτων της σήραγγας

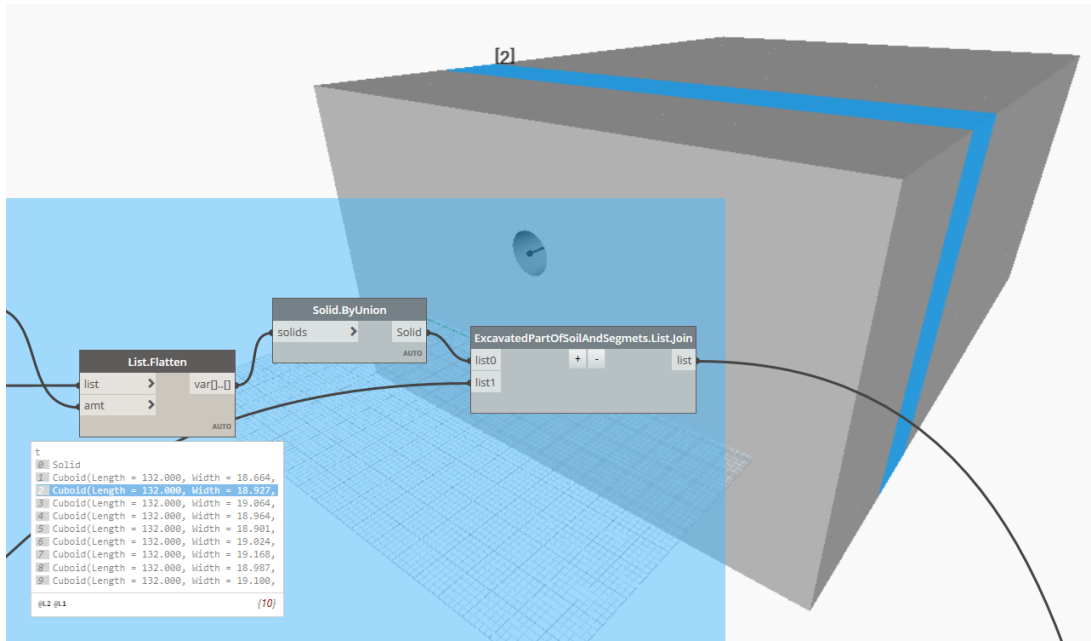
Για την προσομοίωση του εδάφους χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι, τέτοιοι ώστε να συμβαδίζουν με το σχέδιο της μηκοτομής του έργου του μετρό (Σχ. 3.11). Επιπλέον οι διαστάσεις του εδαφικού όγκου, εκτός του βάθους, το οποίο και προσαρμόστηκε στο λείο εξυγιασμένο επίπεδο της επιφάνειας, επιλέχθηκαν ώστε να συμβαδίζουν με τη γεωμετρία της σήραγγας και να σχηματίζουν όγκο, αρκετό να παρακολουθεί το φαινόμενο της διάνοιξης και να αποδίδει ρεαλιστικά αποτελέσματα στο στάδιο της ανάλυσης, το οποίο και απασχολεί η όλη γεωμετρία του μοντέλου, σε επίπεδο κατάλληλης διακριτοποίησης και συνοριακών συνθηκών. Οι τελικές διαμορφωμένες διαστάσεις του όγκου του εδάφους είναι: $189.2m$ μήκος, $132m$ πλάτος και $78m$ ύψος, με βάθος διάνοιξης τα $25m$ που αντιστοιχούν στη μηκοτομή.



Σχ. 3.12: Στιγμιότυπο διάνοιξης εντός στρωματογραφίας του εδάφους υπό υφιστάμενης δομημένης επιφάνειας

Ο όγκος αυτός, εδάφους, εφάπτεται του κελύφους της σήραγγας και υφίσταται διαχωρισμό σε 10 (δέκα) επιμέρους τμήματα ώστε να συμβαδίζει με το προσομοίωμα της σήραγγας και την προοδευτική διαδικασία βημάτων της διάνοιξης, αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα το ρόλο της σήραγγας αντιπροσωπεύει ένα στερεό στοιχείο με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους με το προσομοίωμα της σήραγγας. Ακολουθεί η τομή των δύο στερεών με αποτέλεσμα (output) τον όγκο του εδάφους, αφαιρουμένου του εκσκαπτόμενου όγκου διάνοιξης, ανά βήμα προόδου. Ως παράμετροι λοιπόν, χρησιμοποιήθηκαν η εξωτερική ακτίνα της σήραγγας (r_{outer}), τα ισομήκη τμήματα διαχωρισμού της και οι συντεταγμένες των σημείων της καμπύλης ευθυγραμμίας που καθόρισαν τις διαστάσεις του εδαφικού όγκου. Το τελικό προϊόν αφορά 10 (δέκα) ενιαίους όγκους, έναν ανά βήμα διάνοιξης, που προκύπτουν από την συνένωση των 10 (δέκα) υποτμημάτων, οι οποίοι θα φιλοξενήσουν στο υπολογιστικό στάδιο ανάλυσης, τις ιδιότητες του εδαφικού σκελετού, με $n+1$, $n=0..9$ (10) προοδευτικά, εσωτερικές εκσκαπτόμενες επιφάνειες που προέκυψαν από την τομή (Σχ. 3.13).

Το επίπεδο λεπτομέρειας προσομοίωσης του εδάφους είναι μεσαίο (LoD2), με ικανοποιητικές επιδόσεις σε ότι αφορά τους στόχους της εργασίας.



Σχ. 3.13: Κώδικας Dynamo script – Απεικόνιση μοντέλου πληροφορίας του εδάφους

3.4 Παραμετρικό μοντέλο πληροφορίας εδάφους Ρηχής σήραγγας (Shallow information model)

Στα πλαίσια της διερεύνησης και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ της περίπτωσης του πραγματικού έργου της σήραγγας του μετρό και της εκδοχής της ρηχής σήραγγας, δημιουργείται ένα ακόμη μοντέλο εδάφους με την ίδια ακριβώς διαδικασία. Η μόνη διαφορά είναι ότι στην περίπτωση της ρηχής σήραγγας ο ενιαίος όγκος μεταβάλλεται συναρτήσει του βάθους κατά τη απαραίτητη διαφορά ώστε το έδαφος που υπερκαλύπτει την σήραγga να έχει πάχος υπερκάλυψης 10m. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι το πάχος υπερκάλυψης εδάφους μετρείται από το ανώτερο σημείο της σήραγγας (tunnel crown).

Η παραπάνω διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου ρηχής σήραγγας πραγματοποιήθηκε με απλή αλλαγή των παραμέτρων των συντεταγμένων των σημείων που συνέβαλαν στη δημιουργία του όγκου του εδάφους της πραγματικής περίπτωσης. Αυτό δείχνει την αμεσότητα, την ευελιξία και τον χαρακτήρα της αυτοματοποιημένης διαδικασίας που διέπουν τόσο τα επιμέρους μοντέλα όσο και το τελικό γενικευμένο μοντέλο πληροφορίας, που προκύπτει από τις κατάλληλες συνδέσεις τους.

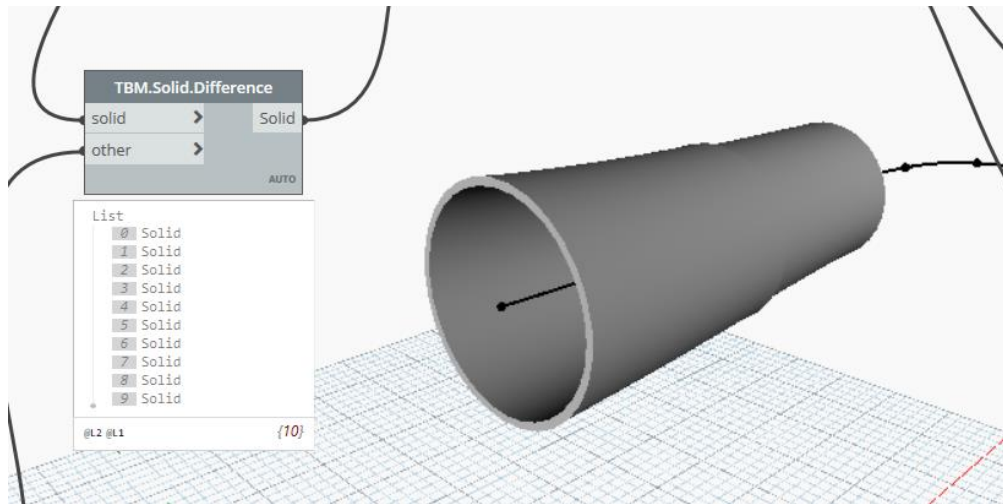
3.5 Παραμετρικό μοντέλο πληροφορίας μηχανήματος διάνοιξης (TBM information model)

Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε το μεσαίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD2) για την προσομοίωση του μηχανήματος διάνοιξης TBM το οποίο εξυπηρετεί ικανοποιητικά την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων και τους σκοπούς της. Στο μοντέλο πληροφορίας δεν περιέχονται οι μηχανικές λεπτομέρειες και ο εσωτερικός εξοπλισμός του μηχανήματος, καθώς αποτελούν χαρακτηριστικά που δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα που απασχολούν την παρούσα εργασία.

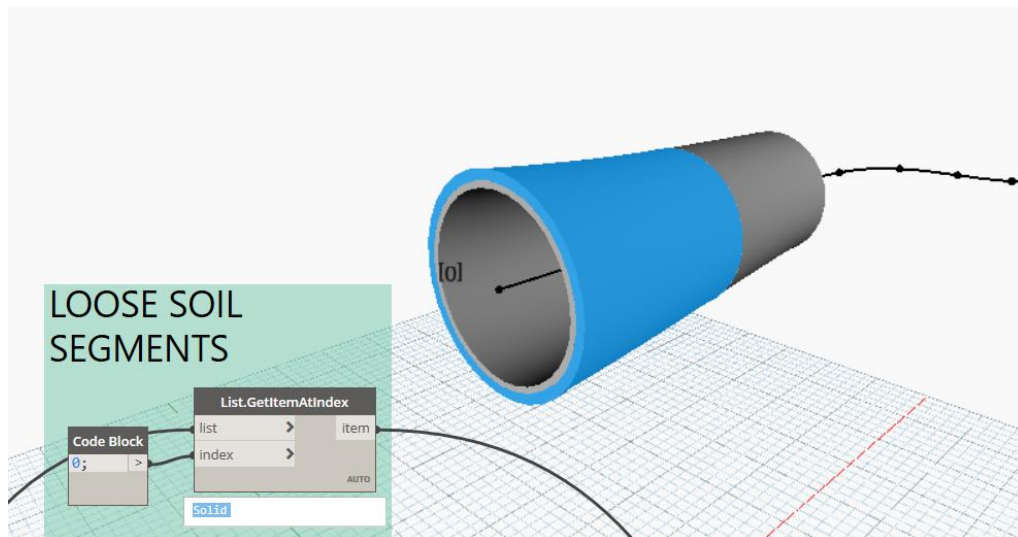
Το μηχάνημα TBM μοντελοποιήθηκε βάσει της ίδια λογικής, προόδου διάνοιξης, όπως της σήραγγας και του εδάφους. Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε για να εξυπηρετήσει μια πιο λεπτομερή απόδοση της διαδικασίας διάνοιξης, στα πλαίσια της δημιουργίας ενός ρεαλιστικού μοντέλου που να περιέχει τα 4 (τέσσερα) βασικά υπομοντέλα της. Ομοίως δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ενέματος και ένα ακόμη, κτιρίων.

Συγκεκριμένα, σε ότι αφορά το μηχάνημα TBM επιλέχθηκε να προσομοιαστεί ως μηχάνημα κλειστού τύπου κατά την μέθοδο EPB διάνοιξης. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι τα δέκα ισομήκη τμήματα της σήραγγας. Σε κάθε ένα από αυτά δημιουργείται ένας στερεός όγκος πάχους ασπίδας $0.25m$. Σε ότι αφορά το διάφραγμα και το μέτωπο κοπής επιλέχθηκε να μην συμπεριληφθεί κατά το στάδιο της ανάλυσης καθώς η παρούσα εργασία δεν προσανατολίζεται στην διερεύνηση των αναπτυσσόμενων πιέσεων κατά την αλληλεπίδραση του εδάφους με το δομικό μηχάνημα. Γενικά το πάχος της ασπίδας του μηχανήματος TBM είναι συνήθως μικρότερο, ωστόσο χρησιμοποιήθηκε ένα μεγαλύτερο πάχος ως προσπάθεια απόδοσης της απόκρισής του, όταν αλληλεπιδρά με το έδαφος, στο στάδιο της ανάλυσης. Το στερεό αυτό προέκυψε από την τομή δύο επιμέρους κυλινδρικών στερεών. Για την απόδοση της κωνικότητας της ασπίδας του, χρησιμοποιήθηκαν ανά τμήμα, κύκλοι διαφορετικής διαμέτρου, από τους οποίους προέκυψε η κυλινδρική μορφή του στερεού, τέτοια ώστε, στο αντίστοιχο μήκος του κάθε τμήματος να συμβαίνει μεταβολή κατά dR με κλίση κατά I (μία) μοίρα. Ως σταθερή παράμετρος, από την οποία μετ' έπειτα προκύπτει η μεταβολή dR , χρησιμοποιήθηκε η εξωτερική ακτίνα της σήραγγας (r_{outter}) από την οποία προκύπτει η εξωτερική ακτίνα του μετώπου κοπής του μηχανήματος TBM ($r_{cutterhead}$), και το πάχος της στρώσης του ενέματος (Σχ. 3.14).

Το μοντέλο του TBM συνοδεύεται από ένα ακόμη μοντέλο, η ανάγκη δημιουργίας του οποίου προκύπτει λόγω του δημιουργούμενου κενού κατά την διάνοιξη, που οφείλεται στην κωνικότητα της ασπίδας (conicity) και την ανοχή κοπής (overcut). Το μοντέλο λοιπόν του κενού, που έχει το ρόλο του χαλαρού διαταραγμένου εδάφους (LooseSoil) από την διαδικασία διάνοιξης, προκύπτει από την τομή ενός στερεού κυλίνδρου ακτίνας ίσης με το άθροισμα της ακτίνας του μετώπου κοπής (cutterhead) του TBM και της ανοχής κοπής και του στερεού που προσομοιώνει το TBM (Σχ. 3.15).



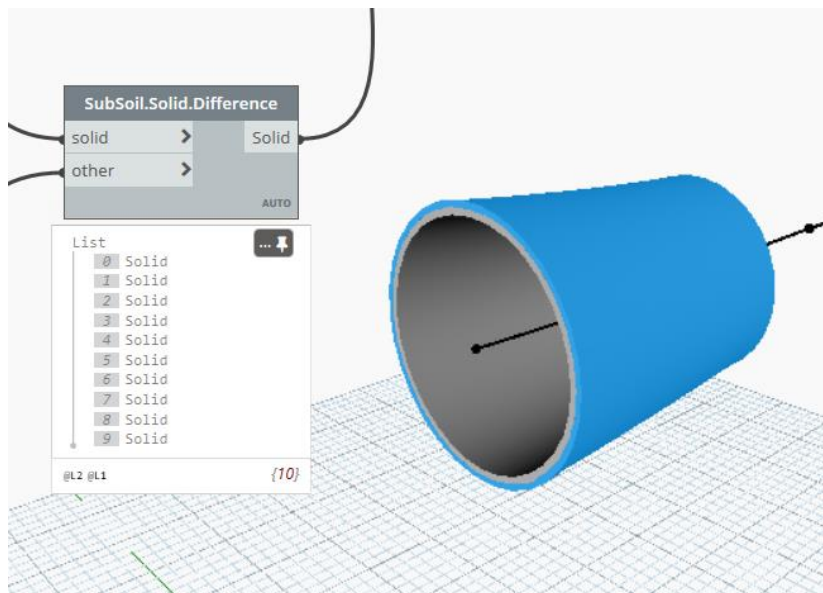
Σχ. 3.14: Κώδικας Dynamo script - Απεικόνιση 2 (δύο) εκ των 10 (δέκα) τμημάτων της ασπίδας του μηχανήματος διάνοιξης TBM



Σχ. 3.15: Κώδικας Dynamo script - Απεικόνιση τμήματος του χαλαρού υπερκείμενου διαταραγμένου εδάφους (LooseSoil)

Κατά το στάδιο της αριθμητικής ανάλυσης προέκυψε το ζήτημα των υψηλότερων απαιτήσεων στην διακριτοποίηση του πολύ λεπτού πάχους των 2.5cm (overcut) του στερεού στοιχείου «χαλαρού, διαταραγμένου εδάφους» σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία προσομοίωσης του μοντέλου. Συγκεκριμένα απαιτήθηκε κατά πολύ, πυκνότερη ανάλυση (finer mesh) συμπαρασέρνοντας ως προς την πύκνωση αυτή και τα υπόλοιπα στοιχεία, σε ένα εύρος

κλίμακας διακύμανσης από mm σε km με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν του αριθμητικού μοντέλου να εμφανίζει αυξημένο υπολογιστικό φορτίο και συνθήκες δυσχέρειας. Προς εξάλειψη αυτού του γεγονότος και εναρμόνισης με την υπόλοιπη υπολογιστική αντιμετώπιση το πάχος του στοιχείου χαλαρού εδάφους τέθηκε στα 25cm ως μία λογική παραδοχή για το πάχος στρώσης μίας πραγματικά διαταραγμένης επιφάνειας τη στιγμή της διάνοιξης και δόθηκε επίσης υπό παραδοχή το αντίστοιχο ελαστικό του μέτρο κατά το στάδιο ανάλυσης. Προς συμπλήρωση του νέου τεχνητού κενού δημιουργήθηκαν αντίστοιχες υποστρώσεις συνεκτικού εδάφους (SubSoil), στερεών στοιχείων πάχους 22.5cm με τις ίδιες ακριβώς ιδιότητες, κατά το στάδιο της ανάλυσης, με το γενικό μοντέλο εδάφους, οι οποίες περιβάλλουν το ένεμα και το συνδέουν με το υπόλοιπο έδαφος (Σχ. 3.16).

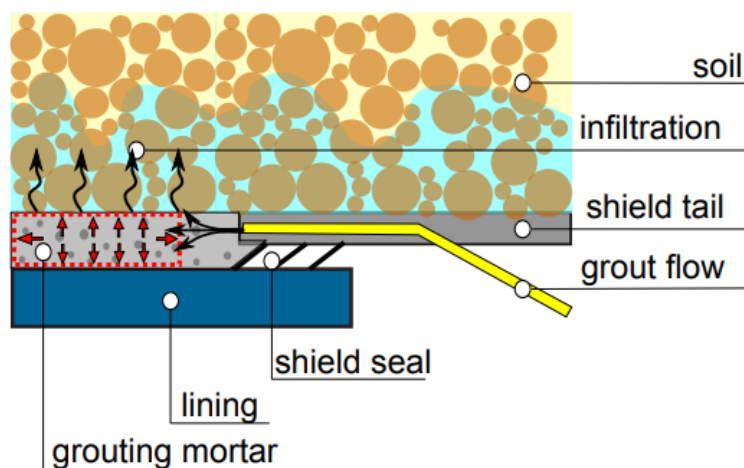


Σχ. 3.16: Κώδικας Dynamo script - Απεικόνιση τμήματος του υποκατάστατου συνεκτικού εδάφους (SubSoil)

3.6 Παραμετρική προσομοίωση ενέματος (Grout)

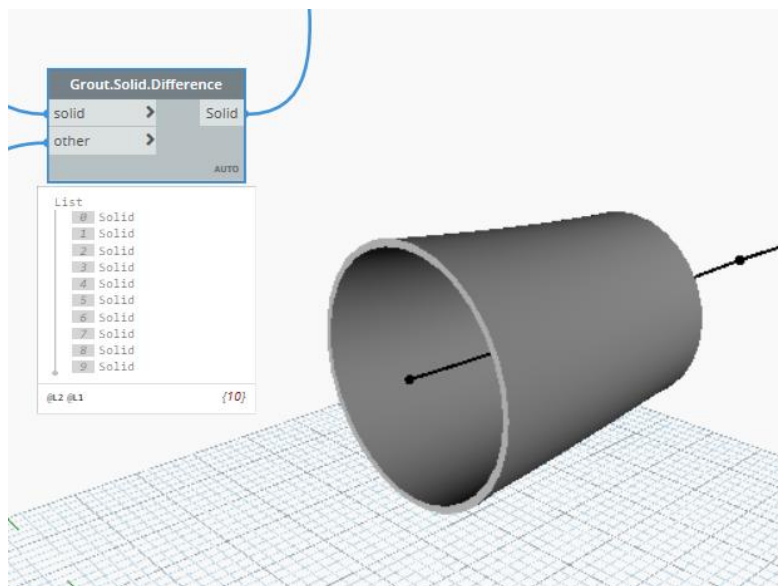
Το δημιουργούμενο από την διάνοιξη κενό μεταξύ του εδάφους και της σήραγγας στο πίσω μέρος της ασπίδας (shield tail) του μηχανήματος, γεμίζει με ένεμα, συμβαδίζοντας με την πρόοδο διάνοιξης από το μηχάνημα και την πρόοδο εγκατάστασης των δακτυλίων, αποτρέποντας έτσι την κίνηση των μαζών εδάφους, στο προς συμπλήρωση κενό (Σχ. 3.17). Ο ρόλος του ενέματος είναι να μεσολαβήσει σε μία ασφαλή σύνδεση μεταξύ του εδάφους και της σήραγγας. Μετά την ενυδατωμένη του μορφή, έγχυσης, σχηματίζει μία στερεή σύνδεση, αποτελώντας μαζί με την σήραγγα τη μόνιμη κατασκευή και υποστήριξή της.

Σε ότι αφορά το ένεμα, που πλέον συμπληρώνει το κενό, αυτό αποτρέπεται από το να εισχωρήσει, όσο είναι σε πιο ρευστή μορφή, εντός του μηχανήματος, μέσω κατασκευαστικών διατάξεων στεγανοποίησης και φραγμού που βρίσκονται μεταξύ της εγκατεστημένης σήραγγας και του πέρατος της ασπίδας. Η ύπαρξη του ενέματος, σε κάθε βήμα διάνοιξης, στο δημιουργούμενο κενό έχει σημαντική επίδραση στην μεταβολή του τασικού πεδίου που επικρατεί στο έδαφος κυρίως γύρω από την απόληξη της ασπίδας, με τελικό αποδέκτη τις επιφανειακές καθιζήσεις του εδάφους, οι οποίες όπως έχει αποδειχθεί επηρεάζονται σημαντικά (Kavvadas et al., 2017).



Σχ. 3.17: Σχεδιαστική απεικόνιση του εδάφους και της υπό πίεση έγχυσης του ενέματος, τοπικά, στο δακτυλιοειδές διανοιγόμενο κενό του πέρατος της ασπίδας (Tail gap grouting)

Το στάδιο της προσομοίωσης απεικονίζει και αποδίδει την παρουσία του ενέματος μέσω δέκα στερεών ισομηκών δακτυλίων που περιβάλλουν το κέλυφος της σήραγγας σε κάθε βήμα. Οι δακτύλιοι αυτοί προκύπτουν μέσω τομής στερεών γεωμετρικών κυλίνδρων με παραμέτρους τις εξωτερικές τους ακτίνες προς διαμόρφωση του κατάλληλου πάχους. Το πάχος των στερεών αυτών τμημάτων προέκυψε από το άθροισμα της παραμέτρου dR που αφορά το κωνικό σχήμα της ασπίδας του μηχανήματος TBM και αυτής της ανοχή κοπής (overcut). Η μεταβολή dR είναι ίση με 22.5cm (ανά 19 μέτρα βήμα αποδίδει κλίση 1.2 μοίρες) και η ανοχή κοπής είναι 2.5cm , οπότε το πάχος του ενέματος προκύπτει ίσο με 25cm ανά βήμα διάνοιξης. Μία συνήθης τιμή του πάχους της στρώσης του ενέματος είναι $10-15\text{cm}$ ωστόσο το μεγάλο μήκος του μηχανήματος για λόγους προσομοίωσης (περίπου 19m ανά βήμα) οδήγησε σε ένα αυξημένο πάχος όχι όμως μεγαλύτερο αυτού της σήραγγας (Σχ. 3.18).



Σχ. 3.18: Κώδικας Dynamo script – Απεικόνιση τμήματος του ενέματος

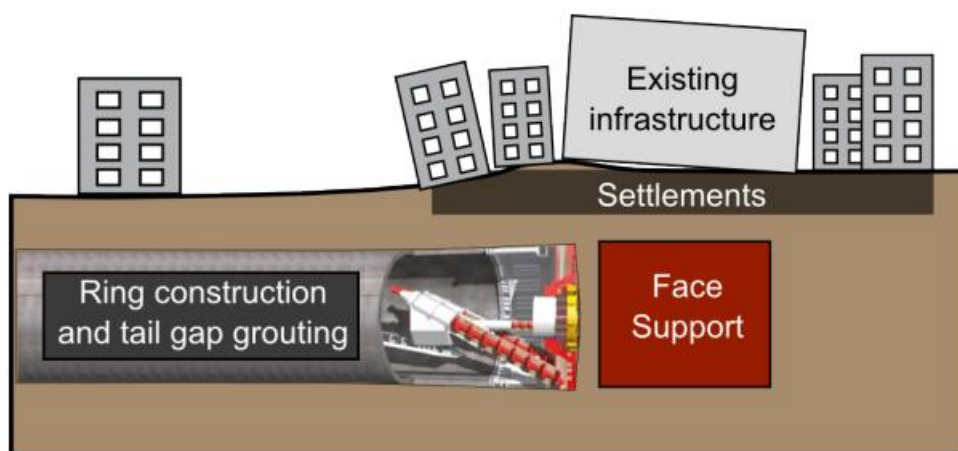
Οι εξαγόμενες γεωμετρίες, των τεσσάρων μοντέλων, συνδέονται κατάλληλα ώστε να αναπαραστήσουν την συνολική διαδικασία διάνοιξης. Έτσι το πρώτο εξαγόμενο αρχείο περιλαμβάνει τον ενιαίο όγκο του εδάφους με τον αφαιρούμενο, εκσκαπτόμενο όγκο του πρώτου τμήματος, το πρώτο τμήμα της γεωμετρίας του μηχανήματος TBM και το πρώτο τμήμα του χαλαρού εδάφους. Το δεύτερο αρχείο περιλαμβάνει επίσης το ενιαίο στερεό εδάφους, με πλέον δύο τμήματα εκσκαπτόμενου όγκου. Ο προηγούμενος όγκος αντικαθίσταται τώρα από το πρώτο τμήμα της σήραγγας, το πρώτο τμήμα του ενέματος και το υποκατάστατο έδαφος, ενώ το TBM με το χαλαρό έδαφος συμπληρώνουν το νέο προοδευτικά εκσκαπτόμενο τμήμα. Η διαδικασία συνεχίζεται ομοίως για κάθε εξαγόμενο αρχείο, με κάθε νέο τμήμα εκσκαφής να συνοδεύεται από το αντίστοιχο τμήμα του TBM και του χαλαρού εδάφους, ενώ όλα τα προηγούμενα, από τα αντίστοιχα τμήματα σήραγγας, ενέματος και υποκατάστατου εδάφους.

3.7 Παραμετρικό μοντέλο πληροφορίας Κτιρίων (Built-Environment information model)

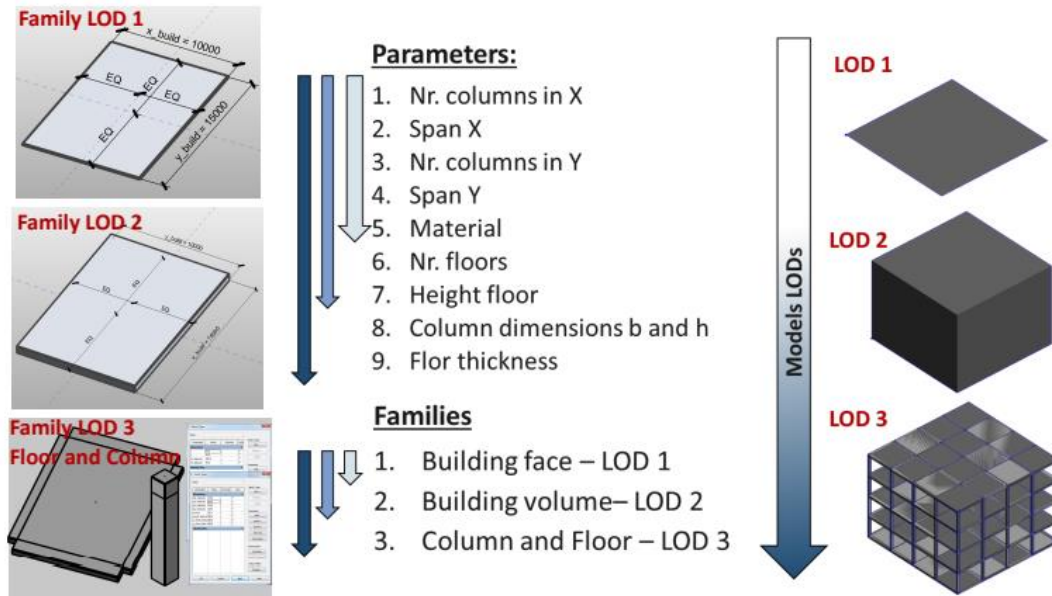
Οι συνεπαγόμενες παραμορφώσεις του εδάφους, κυρίως οι καθιζήσεις της επιφάνειας του, στα αστικά περιβάλλοντα, εγκυμονούν κινδύνους στα υπάρχοντα δομήματα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μια διανοιγόμενη ρηχή σήραγγα, μικρής υπερκάλυψης εδάφους. Το ζήτημα των παραμορφώσεων και της απόκρισης του εδάφους κατά την διάνοιξη αποτελεί ένα τρισδιάστατο πρόβλημα σύζευξης και αλληλοεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων εδάφους-σήραγγας/TBM-κατασκευής. Μία μορφή ζεύξης, αποτελεί το γεγονός ότι ενώ η αναπόφευκτη απώλεια όγκου του εδάφους και η διατάραξή του επηρεάζει τα κτίρια της επιφάνειας, εκείνα λόγω της δομικής τους δυσκαμψίας επηρεάζουν επίσης τις εδαφικές παραμορφώσεις που προκαλούνται κατά τη διάνοιξη (Ninic, 2015).

Η κατανόηση της αμοιβαίας αυτής αλληλεπίδρασης, μεταξύ άλλων, δίνει την δυνατότητα για μία πιο αποδοτική εκτίμηση του κόστους και συμβάλλει στην οικονομία του έργου. Προληπτικά μέτρα που λαμβάνονται για την αποτροπή και την προστασία από πιθανούς κινδύνους κατά την σχεδιασμένη προοδευτική διάνοιξη συχνά καταλήγουν να είναι ανεπαρκή, οδηγώντας σε ανούσια αύξηση του κόστους του έργου. Συνεπώς η αλληλεπίδραση εδάφους-διαδικασίας διάνοιξης-κατασκευών είναι ισχυρή και πρέπει να παρακολουθείται με ακρίβεια και συνέπεια (Σχ. 3.19).

Σε ορισμένες περιπτώσεις, για λόγους σχεδιασμού, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις κατανομές των μέσων τιμών μεγεθών, όπως η καμπτική ροπή, οι αξονικές και διατμητικές δυνάμεις, με ταυτόχρονη διατήρηση της ακρίβειας σε ότι αφορά την συνολική απόκριση των κτιρίων και όχι την λεπτομερή κατανομή τάσεων μεμονωμένα στα μέλη τους. Αν το ενδιαφέρον συγκεντρωθεί στις καθιζήσεις που προκαλούνται λόγω της αλληλεπίδρασης της διάνοιξης με την υφιστάμενη επιφανειακή δόμηση και όχι στην επίδραση των καθιζήσεων στις βλάβες των κτιρίων, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μειωμένης λεπτομέρειας μοντέλα. Σε άλλη περίπτωση αν ο στόχος είναι η απόκτηση πληροφορίας για την επίδραση της διαδικασίας διάνοιξης της σήραγγας στην απόκριση των κτιρίων, απαιτούνται περισσότερο λεπτομερή μοντέλα (Σχ. 3.20). Αυτές οι περιπτώσεις επιδιωκόμενων αποτελεσμάτων δείχνουν την αναγκαιότητα μιας προσέγγισης πολλών επιπέδων πληροφορίας και αλληλοσυσχέτισης μεταξύ του εδάφους και των επιφανειακών κτιρίων κατά τη διαδικασία διάνοιξης.



Σχ. 3.19: Στιγμιότυπο διάνοιξης - Αλληλεπίδραση εδάφους- διαδικασίας διάνοιξης-κατασκευών



Σχ. 3.20: Παραμετρικό μοντέλο Κτιρίων - Αντιστοιχία παραμέτρων και συστατικών μερών ανά επίπεδο λεπτομέρειας

Στα πλαίσια της διερεύνησης της επιρροής της διαδικασίας διάνοιξης στις παραμορφώσεις του εδάφους (καθιζήσεις) και στην υφιστάμενη επιφανειακή δόμηση και βάσει όσων έχουν ειπωθεί παραπάνω, το μοντέλο κτιρίων που δημιουργήθηκε αφορά το υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD3).

Το εν λόγω μοντέλο αφορά την δημιουργία 2 (δύο) δοκιμαστικών κτιρίων, συγκεκριμένων διαστάσεων επιφάνειας, που επιλέχθηκαν και προσαρμόστηκαν βάσει της διαδικασίας επιβολής επιφανειακού φορτίου στο έδαφος κατά το στάδιο της ανάλυσης. Η διαδικασία εξηγείται αναλυτικά, κατά την παράθεση και ερμηνεία των αριθμητικών προσομοιωμάτων του σταδίου της ανάλυσης. Ωστόσο προς κατανόηση της λογικής της ανάπτυξης του μοντέλου, πρέπει να αναφερθεί ότι επιλέχθηκε να αντιπροσωπεύσει και να αντικαταστήσει την απεικόνιση ενός απλού φορτίου, εδρασμένο σε συγκεκριμένη επιφάνεια του εδάφους, έπειτα από διαχωρισμό της σε υποεπιφάνειες, προς εξυπηρέτηση της προσέγγισης της. Ακόμη δόθηκαν ιδιότητες αλληλεπίδρασης με το έδαφος, προς την κατεύθυνση μίας πιο ρεαλιστικής αντιμετώπισης και απεικόνισης.

Αρχικά παράχθηκαν οι στάθμες των κτιρίων. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες σε ότι αφορά την υφιστάμενη δόμηση στην περιοχή της Νίκαιας, υπό της οποίας επιλέχθηκε το τμήμα της σήραγγας προς διερεύνηση, συλλέχθηκαν μέσω της τοπογραφίας της περιοχής και βάσει δεδομένων γεωγραφικής πληροφορίας (GIS). Προέκυψε ότι ο μέσος όρος των ορόφων των κατοικιών είναι 3 (τρεις). Έτσι δημιουργήθηκαν δύο δοκιμαστικά τριώροφα κτίρια επιφάνειας $23.65m$ επί $33m$, επιφάνεια που αφορά το στάδιο υπολογιστικής ανάλυσης. Οι στάθμες που

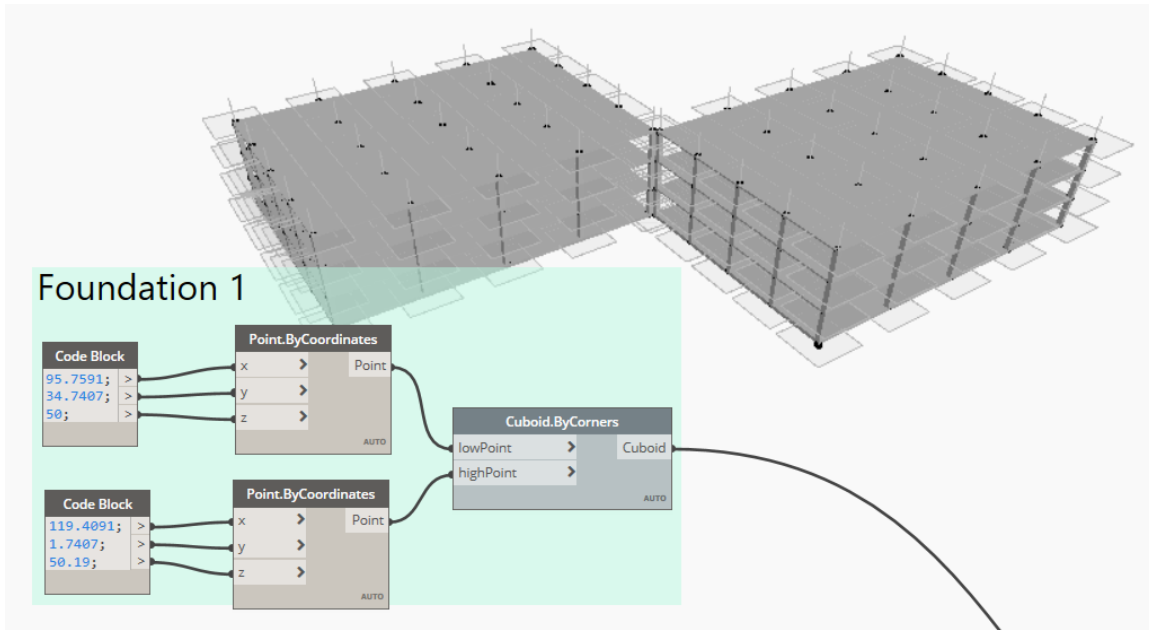
δημιουργήθηκαν ήταν $n+1$, n =αριθμός ορόφων. Η επιπλέον στάθμη αφορά την θεμελίωση τους με μία ενιαία πλάκα έδρασης στο επιφανειακό έδαφος (Σχ. 3.21).

Οι στάθμες αυτές έχουν υψομετρική διαφορά 3m και για κάθε μία δημιουργήθηκε ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα από το οποίο προέκυψαν οι πλάκες πάχους 17cm. Το ορθογώνιο αυτό σχήμα χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός για έναν κάνναβο 5x5 σημείων που αφορούν τα υποστυλώματα των κτιρίων, τα οποία απέκτησαν στερεή μορφή μεταξύ δύο ορθογώνιων, διαστάσεων 0,50x0,50m (Σχ. 3.22).

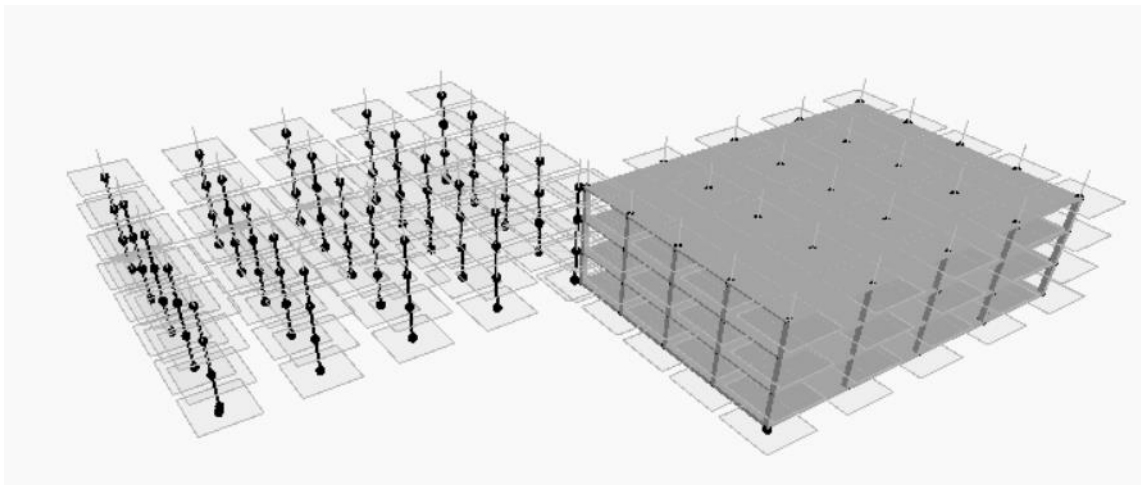
Όλα τα επιμέρους μέλη, οι πλάκες, τα υποστυλώματα και η θεμελίωση ενοποιήθηκαν και προέκυψε η τελική διαμόρφωση των δύο κτιρίων, γεωμετρίας στερεού, που αποτελούν τα δύο εξαγόμενα αρχεία γεωμετρίας (Σχ. 3.23). Τέλος δόθηκαν οι συντεταγμένες προσανατολισμού τους (x,y,z) στον χώρο και προσαρμόστηκαν κατάλληλα στην θέση της επιφάνειας του ενιαίου όγκου του μοντέλου εδάφους.

Συνδυάζοντας πλέον όλα τα ατομικά προσομοιώματα, την σήραγγα και το περιβάλλον ένεμα, το έδαφος με τον εκσκαπτόμενο όγκο, το TBM και την δόμηση της επιφάνειας, τελικώς παράγεται το ολοκληρωμένο, πολυπαραμετρικό, πολυεπίπεδο μοντέλο πληροφορίας της μηχανοποιημένης σήραγγας (Σχ. 3.25).

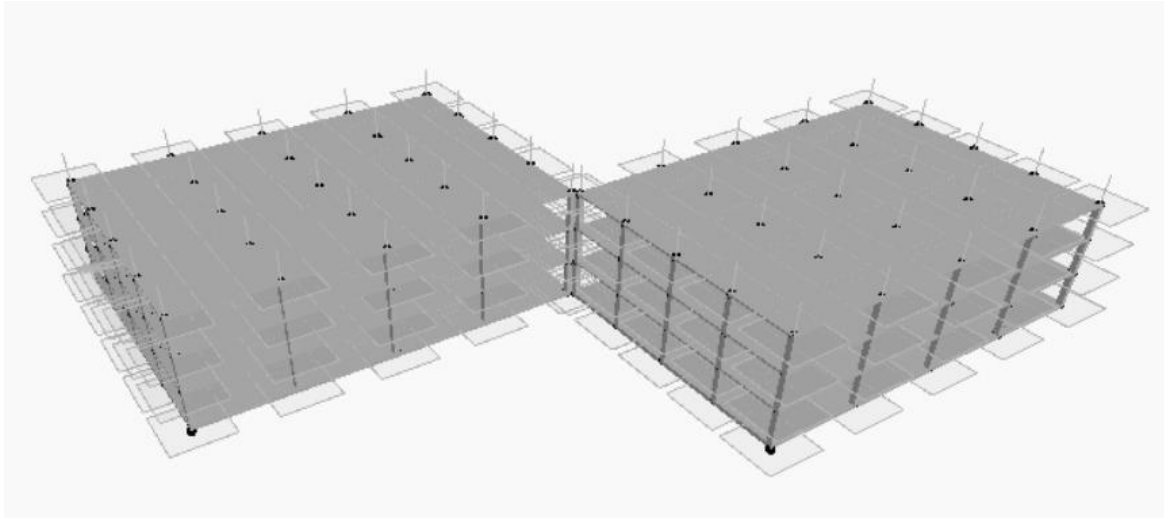
Κάθε ατομικό μοντέλο ορίζει και περιλαμβάνει το ατομικό σετ παραμέτρων και χαρακτηριστικών του, ωστόσο υπάρχει προφανής πλοκή των ατομικών αυτών μοντέλων καθώς ορισμένοι παράμετροι είναι κοινοί και συσχετιζόμενοι. Οι παράμετροι αυτοί ονομάζονται καθολικοί, γενικευμένοι παράμετροι. Το αποτέλεσμα του συνόλου της διαδικασίας αφορά την κατάλληλη συσχέτιση όλων των συστατικών στοιχείων και προκυπτουσών γεωμετριών του μοντέλου εκ των παραμέτρων και την αποθήκευσή τους σε αρχεία εξόδου, τα οποία εν συνεχεία θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του αριθμητικού προσομοιώματος, προς ανάλυση και απόδοση των ζητούμενων αποτελεσμάτων.



Σχ. 3.21: Κώδικας Dynamo script – Δημιουργία στάθμης θεμελίωσης για ένα εκ των δύο ομόλογων κτιρίων της επιφάνειας

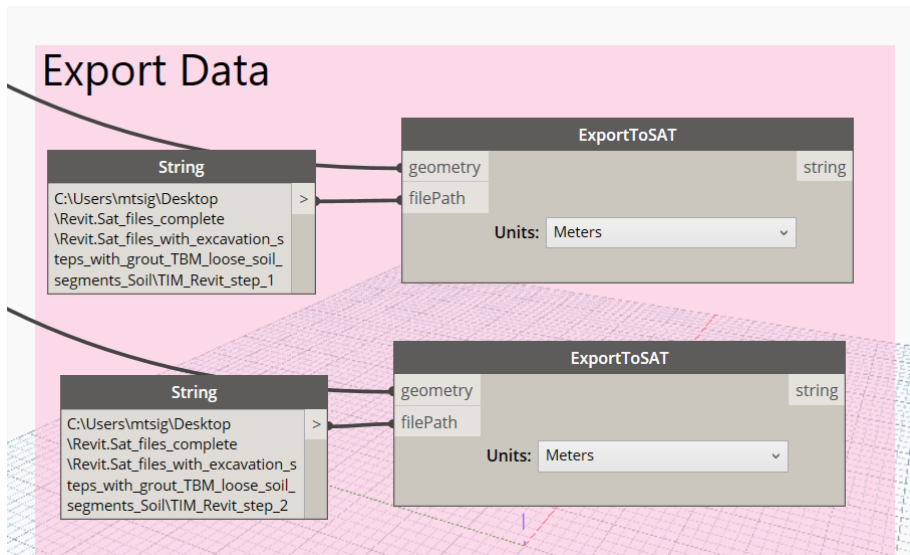


Σχ. 3.22: Απεικόνιση συστατικών στοιχείων απόδοσης των μοντέλων των κτιρίων της επιφάνειας

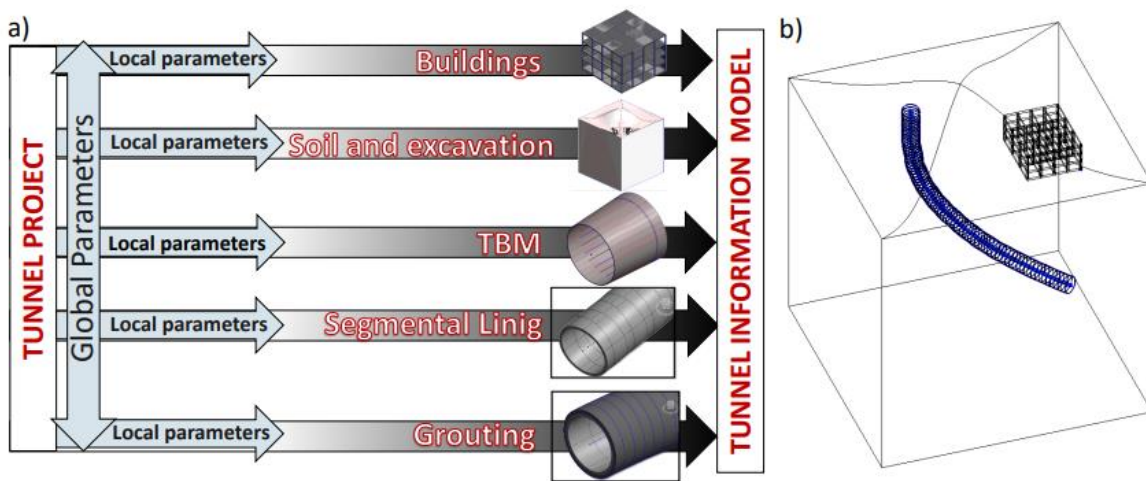


Σχ. 3.23: Απεικόνιση τελικής διαμόρφωσης των 2 (δύο) ομόλογων μοντέλων των κτιρίων της επιφάνειας του εδάφους

Τα παραγόμενα και εξαγόμενα αρχεία, της μορφής *.sat files*, περιλαμβάνουν την γεωμετρία σε ατομικές μονάδες, δηλαδή συμβαίνει και αποθηκεύεται η συσχέτισή τους σαν λίστα γεωμετρικών, ανεξάρτητων μονάδων οντότητας, αλλά όχι η σύνδεσή τους (Σχ. 3.24). Η σύνδεση τους και η ανάπτυξη των αντίστοιχων αλληλοεπιδράσεων πραγματοποιείται κατά την αριθμητική ανάλυση, στην ορθότητα, εγκυρότητα και ακρίβεια της οποίας, συμβάλλει και προσφέρει ευελιξία η όλη διαδικασία εξαγωγής της πληροφορίας τους. Όλες οι παραπάνω ενέργειες συνιστούν μία αυτοματοποιημένη διαδικασία αναπαραγωγής (Dynamo script) και απεικόνισης (Dynamo→Revit) του προς ανάλυση προσομοιώματος της σήραγγας και του περιβάλλοντος με το οποίο αλληλεπιδρά.



Σχ. 3.24: Εξαγωγή των κατάλληλα συσχετισμένων γεωμετριών μέσω της δημιουργίας και της αποθήκευσής τους σε αρχεία .Sat files



Σχ. 3.25: Ολοκληρωμένο μοντέλο πληροφορίας της Μηχανοποιημένης σήραγγας – **Αριστερά:** Συσχέτιση παραγόμενων γεωμετριών, **Δεξιά:** Απεικόνιση του ολοκληρωμένου μοντέλου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Αριθμητική ανάλυση προσομοιώματος σε περιβάλλον Abaqus

4.1 Ανάλυση αριθμητικού προσομοιώματος σε περιβάλλον Abaqus

Το περιβάλλον ανάλυσης Abaqus αποτελεί ένα λογισμικό υψηλών υπολογιστικών δυνατοτήτων ανάλυσης και μεγάλου πλήθους ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών. Σαν περιβάλλον έχει αρκετές δυνατότητες δημιουργίας και σχεδιασμού προσομοιωμάτων, ωστόσο, η διαδικασία ανάπτυξης και προετοιμασίας ενός μοντέλου προς ανάλυση, είναι συμβατή με προγράμματα CAD σχεδιασμού και συνοδεύεται από αρκετές δυνατότητες επεκτάσεων και υποστήριξης κάτι που διευκολύνει την αντιμετώπιση προσομοιωμάτων υψηλής λεπτομέρειας με πολλές παραμέτρους, στα πλαίσια ένταξης του χειρισμού σε μία αυτοματοποιημένη συνολική διαδικασία.

Το πρόγραμμα Abaqus αποτελεί έναν εξειδικευμένο επιλυτή, τόσο γενικών και απλών αναλύσεων όσο και πιο ειδικών και σύνθετων, υψηλής λεπτομέρειας προσομοίωσης και απαιτήσεων αντιμετώπισης. Σε ότι αφορά το υπολογιστικό προφίλ, εφαρμόζει έμμεσο και ρητό σχήμα ολοκλήρωσης (implicit and explicit integration scheme) με πεπερασμένα στοιχεία, για την επίλυση απλών, γραμμικών συστημάτων και πιο σύνθετων, μη γραμμικών, με αρκετά πολύπλοκες συνδέσεις, υπό την επιβολή σύνθετων και παροδικών δράσεων, αντίστοιχα.

Το περιβάλλον αυτό κατά το στάδιο διεξαγωγής των απαραίτητων ενεργειών για την προετοιμασία του εκάστοτε μοντέλου, προσφέρει λεπτομερή απεικόνιση της γεωμετρίας και των αποτελεσμάτων των ενεργειών. Αντίστοιχα συμβαίνει και στο στάδιο των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση, στο οποίο αναδεικνύονται οι δυνατότητες στατικής και δυναμικής απεικόνισης (animation) της παραμορφωμένης κατάστασης.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν το περιβάλλον Abaqus, ένα περιβάλλον υψηλής ποιότητας ανάλυσης και χειρισμού που προσφέρει, εκτός από αυξημένες δυνατότητες υπολογισμού, την ευχέρεια απεικόνισης και εποπτείας της συνολικής διαδικασίας.

Στην πράξη συνήθως τα μοντέλα ανάλυσης λαμβάνουν πληροφορίες και δεδομένα από και για ένα συγκεκριμένο και αποκλειστικό έργο. Αν κάποιο έργο απαιτεί την διερεύνηση διαφορετικών σχεδιαστικών παραμέτρων και μεταβλητών, είναι πολύ πιθανό να χρειαστεί αντίστοιχα η παραγωγή διαφορετικών μοντέλων ανάλυσης κάτι που συνοδεύεται από μεγάλο υπολογιστικό φορτίο και χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση το αριθμητικό προσομοίωμα γίνεται ο δυσχερών παράγοντας της απόδοσης της συνολικής διαδικασίας. Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαία η παραγωγή ενός αποδοτικού αριθμητικού προσομοιώματος με δυνατότητα μείωσης της προσπάθειας και των ενεργειών παραγωγής του που να αποδίδει παράλληλα έγκυρα αποτελέσματα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία προσεγγίζει την διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης και ανάλυσης του μοντέλου πληροφορίας της μηχανοποιημένης σήραγγας μέσω διαφορετικών και

στοχευόμενων περιπτώσεων προσομοίωσης. Το γενικό πλαίσιο αφορά την αριθμητική προσομοίωση και επεξεργασία του μοντέλου, αποτελούμενο από τα υπομοντέλα του εδάφους, της σήραγγας και των κτιρίων. Τα μοντέλα αυτά αφορούν διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας κατά την αριθμητική τους προσομοίωση.

Σε μία προσπάθεια πιο εξειδικευμένης και ρεαλιστικής προσέγγισης εφαρμόζεται στην διαδικασία το μοντέλο του μηχανήματος TBM προς απόδοση της διαδικασίας διάνοιξης. Ακόμη ενσωματώνεται και το μοντέλο ενέματος, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά και θεωρητικά, εξαρτώμενο συστατικό μέρος, καθώς η εφαρμογή του και η ύπαρξή του καθορίζεται από το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας της ανάλυσης, στα πλαίσια της αρχής ότι κάθε επιθυμητό αποτέλεσμα ανάλυσης συνδέεται και με το αντίστοιχο επίπεδο λεπτομέρειας μέσω της κατάλληλης συσχέτισης ατομικών μοντέλων διαφορετικών επιπέδων, όπως έχει ήδη αναφερθεί και εξηγηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο (Σχ. 4.1). Συγκεκριμένα το μοντέλο ενέματος συναντάται στο υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD3) του μοντέλου προσομοίωσης της σήραγγας.

		Dependent components											
		soil	Lining			TBM			building			grouting	excavation
soil	Lod1		X	✓	✓	X	X	X	X	✓	✓	X	X
	Lod2		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Lod3		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lining	Lod1					X	X	X	✓	✓	✓	X	✓
	Lod2					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Lod3					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TBM	Lod1								✓	✓	✓	✓	✓
	Lod2								✓	✓	✓	✓	✓
	Lod3								✓	✓	✓	✓	✓
building													

Σχ. 4.1: Δυνατοί συνδυασμοί των αριθμητικών μοντέλων σχετικά με το επίπεδο λεπτομέρειας τους

Το αριθμητικό προσομοίωμα του μοντέλου πληροφορίας της μηχανοποιημένης σήραγγας αναπτύσσεται και αναλύεται στο περιβάλλον Abaqus. Τα αποθηκευμένα, εξαγόμενα αρχεία .sat files από το Dynamo script, εισάγονται στο Abaqus με τη δυνατότητα υπερσύνδεσης των δύο προγραμμάτων, σε όρους συστατικών μερών (parts). Η υπερσύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της δυνατότητας και της συμβατότητας των δύο προγραμμάτων καθώς και της ευελιξίας των .sat αρχείων εξαγωγής. Έχοντας δημιουργηθεί ένα έγκυρο και ακριβές σετ γεωμετριών, κατάλληλα συσχετισμένων προς εξαγωγή (output data) και αποθήκευση σε αρχεία .sat, το Abaqus εισάγει

τα δεδομένα αυτά (import parts) στο περιβάλλον απεικόνισης του με αντίστοιχη εγκυρότητα και ακρίβεια γεωμετρίας.

Η έννοια της συμβατότητας και της υπερσύνδεσης μεταξύ των δύο προγραμμάτων αναπτύσσεται στα πλαίσια μίας γενικότερης ιδέας εκτέλεσης αυτοματοποιημένων διαδικασιών κάτι που διέπει τόσο το μοντέλο πληροφορίας ανάπτυξης της γεωμετρίας, όπως ήδη έχει περιγραφεί, όσο και το αριθμητικό μοντέλο ανάλυσης του οποίου τα χαρακτηριστικά και οι διαδικασίες θα εξηγηθούν παρακάτω.

4.2 Αριθμητικό μοντέλο εδάφους

Μία από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις στο στάδιο της υπολογιστικής αριθμητικής ανάλυσης είναι η σωστή μοντελοποίηση του εδάφους και των υδραυλικών συνθηκών που επικρατούν εντός του. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την προσομοίωση της πολυφασικής σύνθεσης του εδάφους και της ικανότητας των ρευστών στοιχείων του νερού και του αέρα να ρέουν εντός του πορώδους του (Nagel, 2009) ακόμη και της διαδικασίας μεταφοράς μικροσωματιδίων εδάφους εντός αυτού, κατά την ροή (Schaufler et al., 2013). Εκτός από μία κατάλληλη περιγραφή της υδραυλικής συμπεριφοράς του εδάφους, ένα κύριο χαρακτηριστικό της σωστής προσομοίωσης είναι η ρεαλιστική περιγραφή της απόκρισης του εδαφικού σκελετού. Ακόμη και σήμερα όμως δεν υπάρχει κάποιο ατομικό, αυτόνομο μοντέλο που να περιγράφει με σαφήνεια όλες τις πτυχές της συμπεριφοράς του εδάφους, συνοδευόμενο πάντα με ένα λογικό πλήθος παραμέτρων εισόδου, λόγω της πολυπλοκότητας που διέπει την πραγματική εδαφική συμπεριφορά.

Στα πλαίσια της εφαρμογής των καταστατικών εδαφικών μοντέλων στην προσομοίωση απαιτείται η κατάλληλη βαθμονόμηση τους μέσω ενός συνδυασμού με εργαστηριακές δοκιμές, κάτι που δεν αποτελεί σε όλες τις περιπτώσεις μία εύκολη διαδικασία όταν πρόκειται για πολύπλοκες εδαφικές αποθέσεις που συνοδεύονται από μεγάλο πλήθος παραμέτρων. Επιπρόσθετα, κάποιες από αυτές πιθανών να μην έχουν φυσική ερμηνεία. Για τον λόγο αυτό ένα σημείο κλειδί για την διαδικασία προσομοίωσης είναι η εύρεση ισορροπίας μεταξύ της πολυπλοκότητας του μοντέλου εδάφους και των απαραίτητων εργαστηριακών δοκιμών και διαδικασιών ορθής βαθμονόμησης του.

Η αριθμητική ανάλυση της επιρροής των στηρίξεων της δομικής σήραγγας, κατά την συνολική απόκριση της κατασκευής του έργου, τυπικά μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συνολική κατασκευαστική ανάλυση, αλλά μέσω εφαρμογής ειδικών μοντέλων για την σήραγγα και τις διατάξεις των στηρίξεων της. Κατά την διαδικασία αυτή, η αντοχή και ο ρόλος του περιβάλλοντος εδάφους μπορούν να μοντελοποιηθούν ως διάταξη ελατηρίων αντίδρασης με τις εκάστοτε τοπικές, χωρικές και μηχανικές ιδιότητες του υπεδάφους για την εκάστοτε περίπτωση (Σχ. 4.2).

Σε ότι αφορά την μοντελοποίηση των κτιρίων στην επιφάνεια (αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής) μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης (Limited Tensile Strain Method) (Burland and Wroth, 1975) ή η μέθοδος δοκού Winkler για την

πρόβλεψη των βλαβών των κτιρίων από της συνεπαγόμενες εδαφικές παραμορφώσεις και καθιζήσεις της επιφάνειας κατά την διαδικασία διάνοιξης. Η πρόβλεψη της LTSM μεθόδου βασίζεται στον υπολογισμό προκυπτουσών εφελκυστικών παραμορφώσεων σε μία κατασκευή κτιρίου, λόγω επιβαλλόμενων διαφορικών, κατακόρυφων και οριζόντιων, εδαφικών παραμορφώσεων. Η μέθοδος LTSM αποτελεί μία εμπειρική αναλυτική μέθοδο που θεωρεί πλήρη μεταφορά των εδαφικών μετακινήσεων στο κτίριο, χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση του εδάφους με αυτό.

Γενικώς, σε ότι αφορά το φαινόμενο της αλληλοεπίδρασης, ένας από τους στόχους της αριθμητικής προσομοίωσης είναι η επίτευξη της, με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό βαθμών ελευθερίας (DoFs). Ωστόσο είναι δυνατό να συμβαίνουν και ορισμένες επεκτάσεις που περιλαμβάνουν εκτός της αλληλεπίδρασης και τον βαθμό επιρροής της.

4.2.1 Αριθμητικό μοντέλο εδάφους-Επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs)

Στο χαμηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD1), για την απεικόνιση του μοντέλου του εδάφους μπορεί να καταστρατηγηθεί, ένα μοντέλο με υποκείμενες εδαφικές αντιδράσεις, όπου το έδαφος προσομοιώνεται ως ένα πλήθος διάταξης άζευκτων και απειροστού μήκους ελατηρίων, αμελώντας το ίδιο βάρος (μάζα) του εδαφικού όγκου και την ύπαρξη αλληλεπίδρασης του με την κατασκευή (Σχ. 4.2, LoD1). Η γραμμική ελαστική αντίδραση του υποκείμενου εδάφους δίνεται μέσω της γραμμικής σχέσης ελαστικότητας ($P=Ku$) εφόσον τα ελατήρια συμπεριφέρονται ως γραμμικά ελαστικά στοιχεία, όπου η μεταβλητή P αποτελεί την εξασκούμενη επιφανειακή πίεση που μεταβιβάζεται στο έδαφος και που προέρχεται από την υφιστάμενη επιφανειακή δόμηση και η μεταβλητή K το μέτρο αντίδρασης του εδάφους (Δείκτης εδάφους). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την απόκτηση ικανοποιητικών αναλυτικών λύσεων και αποτελεσμάτων παραμόρφωσης των κτιρίων της επιφάνειας του εδάφους, χρησιμοποιώντας την σχέση κατά Winkler:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = q_0(x) - r(x) \quad \text{where} \quad r(x) = B * K_h * w(x)$$

Όπου η ποσότητα EI αποτελεί την ιδιότητα δυσκαμψίας δοκού, το B το πλάτος δοκού, το K_h τον συντελεστή οριζόντιας αντίδρασης του υπεδάφους. Οι όροι $w(x)$ και $q_0(x)$ αποτελούν συναρτήσεις της δοκού και του επιβαλλόμενου φορτίου αντίστοιχα.

Ωστόσο, ο στόχος είναι η εύρεση του μέτρου αντίδρασης K του εδάφους, το μέγεθος του οποίου δεν είναι μετρήσιμο. Με την εφαρμογή ενός μηχανικού αναλόγου κατά *Vesic (1963)* προέκυψε η εξής σχέση για την εύρεση του συντελεστή αντίδρασης K :

$$K_s = \frac{Es}{BI_p(1 - \nu^2)}$$

Όπου το I_p αποτελεί τον συντελεστή σχήματος του θεμελίου.

	LOD 1	LOD 2	LOD 3
Information model	<pre> 1 material soil_1 2 model_type drucker_prager 3 youngs_modulus 20000000.0 4 poissons_ratio 0.25 5 density 1732.0 6 porosity 0.4 7 cohesion 100000.0 8 hardening_modulus 2033333.0 9 internal_friction_angle 30.0 10 KO 1.0 11 permeability 1e-02 12 13 material soil_2 14 model_type drucker_prager 15 youngs_modulus 100000000.0 16 poissons_ratio 0.25 17 density 2038.0 18 porosity 0.25 19 cohesion 200000.0 20 hardening_modulus 50000000.0 21 internal_friction_angle 35.0 22 KO 1.0 23 permeability 1e-02 </pre>		
Numerical model			

Σχ. 4.2: Απεικονίσεις του παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας (πάνω) και του αριθμητικού προσομοιώματος (κάτω) του εδάφους, ανά επίπεδο λεπτομέρειας

Σε ότι αφορά την διαδικασία εύρεσης του μέτρου αντίδρασης των ελατηρίων που αποτελούν το περιβάλλον έδαφος της σήραγγας, σύμφωνα με τον *Kolymbas (1998)* η δυσκαμψία αυτή εξαρτάται από την ιδιότητα της δυσκαμψίας του εδάφους (E), τον λόγο Poisson (ν) και την ακτίνα (r) του δακτυλίου της σήραγγας σύμφωνα με την σχέση:

$$K_s = \frac{E}{r} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

Στο μεσαίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD2) αριθμητικής προσομοίωσης του εδάφους, το έδαφος μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα ‘κατασκευαστικό’ μοντέλο, διακριτοποιημένο με πεπερασμένα στοιχεία και η γεωμετρία του να αποδοθεί ως ένα κυβοειδές σχήμα, που διακατέχεται από συνοριακές συνθήκες.

Το πόσο και το πώς εκτείνεται το δίκτυο διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων (FE elements) του μοντέλου εδάφους που περιβάλλει τη σήραγγα, εξαρτάται από τη γεωμετρία της σήραγγας (lining), τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν, τον τύπο των επιδιωκόμενων εξαγόμενων αποτελεσμάτων και την μέθοδο διάνοιξης (*Abel and Lee, 1973; Elberhardt, 2001;*

Granziani et al., 2007). Συγκεκριμένα, η διάνοιξη μέσω μηχανήματος TBM με ασπίδα, προκαλεί σχετικά μικρές ζώνες πλαστικής παραμόρφωσης (yield) γύρω από την εκσκαφή κάτι που επιτρέπει την μείωση πλευρικής έκτασης του μοντέλου εδάφους. Έχουν δημοσιευτεί αρκετοί κανόνες όσον αφορά τις βέλτιστες συνοριακές συνθήκες (αποστάσεις από σήραγγα που εκτίνεται η εδαφική μάζα στον χώρο και διαστάσεις του κυβοειδούς) ώστε να μειώνονται όσο το δυνατό οι επιδράσεις τους στα επιδιωκόμενα αποτελέσματα (*Lamburghi et al., 2012; Zhao et al., 2012*).

Μία περίπτωση κορεσμένου εδάφους μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πλήρως κορεσμένο, διαφασικό υλικό (δύο διακριτές φάσεις: έδαφος, νερό) σύμφωνα με την θεωρία και τις ιδιότητες του πορώδους του εδάφους (*Nagel and Meschke, 2010*). Για τα πλήρως κορεσμένα χαλαρά εδάφη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας τύπος πεπερασμένων στοιχείων, δύο πεδίων. Οι εξισώσεις που διέπουν την διαδικασία που πραγματοποιείται στο μοντέλο, προκύπτουν από την κάπως αδύναμη μαθηματική έκφραση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας (δW_w) για την υδατική ροή εντός του πορώδους του εδάφους, καθώς και της εξίσωσης (δW_m). Οι σχέσεις αυτές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την περίπτωση του πορώδους του ενέματος σε περίπτωση εφαρμογής του στο μοντέλο, είναι οι εξής:

$$\delta W_w = \delta W_{w,int} - \delta W_{w,ext} = 0, \quad \delta W_m = \delta W_{m,int} - \delta W_{m,ext} = 0$$

με

$$\begin{aligned} \delta W_{w,int} &= \int_{\Omega} \delta p_w \mathbf{I} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \, d\Omega, & \delta W_{w,ext} &= \int_{\Omega} \delta \nabla p_w \cdot \mathbf{q} \, d\Omega - \int_{\Gamma_q} \delta p_w q^* \, d\Gamma_q \\ \delta W_{m,int} &= \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon} : (\boldsymbol{\sigma}' + \mathbf{I} p_w) \, d\Omega, & \delta W_{m,ext} &= \int_{\Omega} \delta \mathbf{u} \cdot \rho \mathbf{g} \, d\Omega - \int_{\Gamma_\sigma} \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{t}^* \, d\Gamma_\sigma \end{aligned}$$

Η παράμετρος (ε) δηλώνει τον τελεστή παραμόρφωσης, το (q) την ροή του νερού εντός του πορώδους και το (q^*) την ροή (εισροή/εκροή) στις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Το μέγεθος (σ) είναι ο τελεστής συνολικής τάσης, το (ρ) η πυκνότητα, το (g) η επιτάχυνση της βαρύτητας και τέλος το (t^*) το ελκτικό διάνυσμα. Τα (p_w) και (u) αποτελούν τις πιέσεις (υπερπίεσεις/υποπίεσεις) του νερού του πορώδους και τις μετατοπίσεις του εδάφους (ή του ενέματος), αντίστοιχα.

Στο υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD3) το μοντέλο του εδάφους υφίσταται την ίδια διαδικασία αντιμετώπισης υπολογισμού μέσω των πεπερασμένων στοιχείων όπως στο μεσαίο. Η διαφορά είναι ότι η διακριτοποίηση συμβαίνει για κάθε στρώμα εδαφικού όγκου ξεχωριστά, στα πλαίσια μιας πιο λεπτομερούς προσομοίωσης. Στο επίπεδο αυτό υπάρχει ακόμη η δυνατότητα διακριτού ορισμού συνθηκών αλληλοεπίδρασης στις αντίστοιχα διακριτές διεπιφάνειες εδάφους-

σήραγγας/κτιρίων αλλά και ανά στρώση εδάφους, με παρουσία συνθηκών ολίσθησης και ανακατανομής των υπερπίεσεων του νερού εντός του πορώδους.

Εκτός όμως από την παραπάνω ανάπτυξη, βάσει επιθυμητού επιπέδου λεπτομέρειας, κατάλληλης μοντελοποίησης, για τις αριθμητικές προσομοιώσεις της διαδικασίας της μεθόδου μηχανοποιημένης σήραγγας, ένα σημείο κλειδί μίας αντιπροσωπευτικής απόδοσης είναι η προσέγγιση της ρεαλιστικής περιγραφής της απόκρισης (τάσεις-παραμορφώσεις) του εδαφικού σκελετού. Προς το παρόν, λόγω της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει την πραγματική απόκριση και συμπεριφορά του εδάφους, δεν έχει υπάρξει η δυνατότητα ανάπτυξης ενός ατομικού, αυτόνομου μοντέλου που να περιγράφει όλες τις πτυχές της, με έναν λογικό, πάντα, αριθμό παραμέτρων εισόδου (*Potts and Zdravkovic, 1999*).

Σχετικά με τον τύπο του εδάφους και τις διαθέσιμες παραμέτρους υλικών, μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά μοντέλα υλικών. Αν δεν υπάρχει κάποια ακριβής και έγκυρη γνώση της συμπεριφοράς των υλικών του εδάφους, το απλούστερο μοντέλο εδάφους που μπορεί να εφαρμοστεί είναι το γραμμικό, ελαστικό. Καθώς η ελαστική συμπεριφορά είναι μία συμπεριφορά, μη ρεαλιστική για το έδαφος, μπορούν να αναπτυχθούν διαφορετικά καταστατικά μοντέλα ελαστοπλαστικού χαρακτήρα όπως τα μοντέλα με ιδιότητες αστοχίας Mohr Coulomb και Drucker Prager, τα οποία κυρίως χρησιμοποιούνται σε αμμώδη εδάφη. Ακόμη μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα πιο γενικά αμμώδη και αργιλικά μοντέλα των οποίων οι επιφάνειες διαρροής χαρακτηρίζονται από μη συσχετιζόμενη πλαστικότητα και από εξάρτιση από την γωνία του Lode (*Yu, 1998*). Γενικώς, στην γεωτεχνική μηχανική είναι αποδοτικό να γίνεται χρήση εναλλακτικών μεταβλητών ποσοτήτων που αποτελούν συνδυασμούς, βάσει της αρχής των ενεργών τάσεων. Μία αντίστοιχη αποδοτική επιλογή συνδυασμού είναι η εξής:

Μέση ενεργός τάση:

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$$

Αποκλίνουσα τάση:

$$J_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2}$$

Γωνία του Lode:

$$\vartheta = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \left(2 \frac{(\sigma'_2 - \sigma'_3)}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)} - 1 \right) \right]$$

Η θεωρία γραμμικής ελαστικότητας έχει μεγάλη ιστορία εφαρμοσιμότητας στα γεωτεχνικά προβλήματα. Η βασική και γενική αρχή της γραμμικής ελαστικότητας είναι η αρχή της κοινώς, βαθμιαίας μεταβολής των τάσεων και των παραμορφώσεων. Η γενική καταστατική σχέση που συνδέει τις βαθμιαίες κοινές μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων, όπως αποδίδεται με την μορφή πινάκων, είναι η εξής:

$$\begin{pmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{yz} \\ \Delta\tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1112} & C_{1123} & C_{1113} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2212} & C_{2223} & C_{2213} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3312} & C_{3323} & C_{3313} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1212} & C_{1223} & C_{1213} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2312} & C_{2323} & C_{2313} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1312} & C_{1323} & C_{1313} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{yz} \\ \Delta\gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

,όπου $[C]$ είναι ο καταστατικός πίνακας.

Στην ισότροπη γραμμική ελαστικότητα, η καταστατική σχέση περιγράφεται από δύο επιπρόσθετες, βασικές σταθερές. Προκύπτει η παρακάτω σχέση συναρτήσεως του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και του λόγου Poisson (ν):

$$C = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix}$$

Εναλλακτικά, ο καταστατικός πίνακας $[C]$ μπορεί να οριστεί μέσω των μέτρων της ενεργού διάτμησης (shear modulus) και της διόγκωσης (bulk modulus) G, K ως εξής:

$$C = \begin{pmatrix} K + \frac{3}{4}G & K - \frac{2}{4}G & K - \frac{2}{4}G & 0 & 0 & 0 \\ & K + \frac{3}{4}G & K - \frac{2}{4}G & 0 & 0 & 0 \\ & & K + \frac{3}{4}G & 0 & 0 & 0 \\ & & & G & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & G & 0 \\ & & & & & G \end{pmatrix}$$

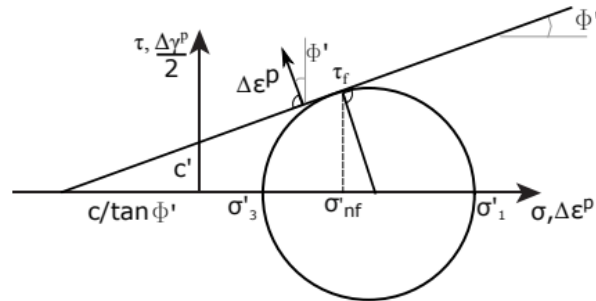
Όπου $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ και $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$

4.2.2 Κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb and Ducker Prager

Το κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb και Drucker Prager περιγράφεται, σε όρους ενεργών τάσεων, από τη σχέση:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan(\phi')$$

Όπου c' είναι η ενεργός συνοχή του εδάφους, τ_f είναι η διατμητική τάση αστοχίας (διατμητική αντοχή) και σ' η ενεργός τάση κατά την αστοχία. Σε αυτή την περίπτωση κριτηρίου αστοχίας οι θλιπτικές ορθές τάσεις θεωρούνται με θετικό πρόσημο (Σχ. 4.3).



Σχ. 4.3: Περιβάλλουσα του κριτηρίου αστοχίας Mohr Coulomb (Σημείωση: Οι θλιπτικές τάσεις θεωρούνται με θετικό πρόσημο)

Αν το παραπάνω κριτήριο αστοχίας μετασχηματισθεί σε όρους κύριων τάσεων αποκτά την εξής μορφή:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c' \cos(\phi') + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\phi')$$

Εν συνεχεία, μπορεί να εκφρασθεί ως συνάρτηση διαρροής:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \zeta) = \sigma'_1 - \sigma'_3 + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\phi) - 2c' \cos(\phi) \leq 0.$$

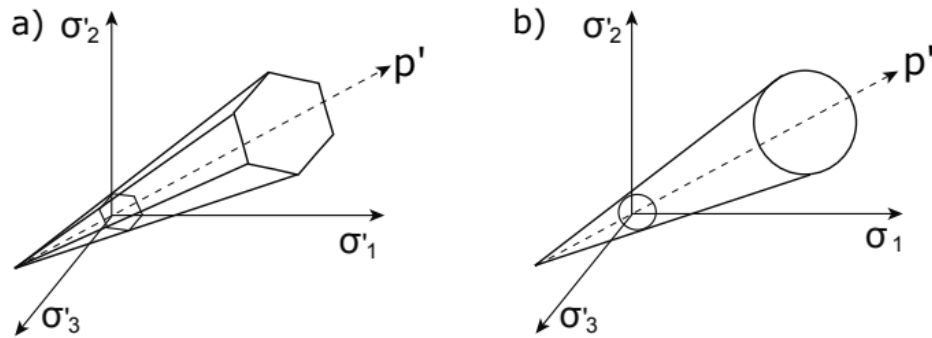
Ακολούθως μπορεί να αναπτυχθεί η έκφραση:

$$F(\boldsymbol{\sigma}) = J_2 - \left(\frac{c'}{\tan(\phi')} + p' \right) g(\theta)$$

με

$$g(\theta) = \frac{\sin(\phi')}{\cos(\theta) + \frac{\sin(\theta) \sin(\phi')}{\sqrt{3}}}$$

Σε όρους χωρικής εξέλιξης και απόδοσης του τελικού αποτελέσματος του κριτηρίου, σε ένα σύστημα κύριων τάσεων, αποδίδεται η περιβάλλουσα εδαφικής διαρροής ως ένας κώνος αστοχίας έξι πλευρών με τον κεντρικό του άξονα προσανατολισμένο στον υδροστατικό άξονα (p') (Σχ. 4.4, a):



Σχ. 4.4: Επιφάνεια διαρροής, σε όρους χωρικής εξέλιξης, για τα μοντέλα: a) Mohr-Coulomb και b) Drucker-Prager

Ένα σημαντικό σφάλμα του συγκεκριμένου κριτηρίου είναι ότι αποτελεί μοντέλο πολλών επιφανειών όταν αποδίδεται σε χωρική απεικόνιση, σε όρους κύριων τάσεων και συνοδεύεται από αριθμητικές δυσκολίες του υπολογισμού της παραγώγου. Για τον λόγο αυτό το κριτήριο γενικεύεται σε μία συνάρτηση διαρροής με απόδοση τελείως κωνικής επιφάνειας διαρροής, διατομής κύκλου. Αυτή η γενίκευση αναφέρεται στην συνάρτηση διαρροής Drucker-Prager.

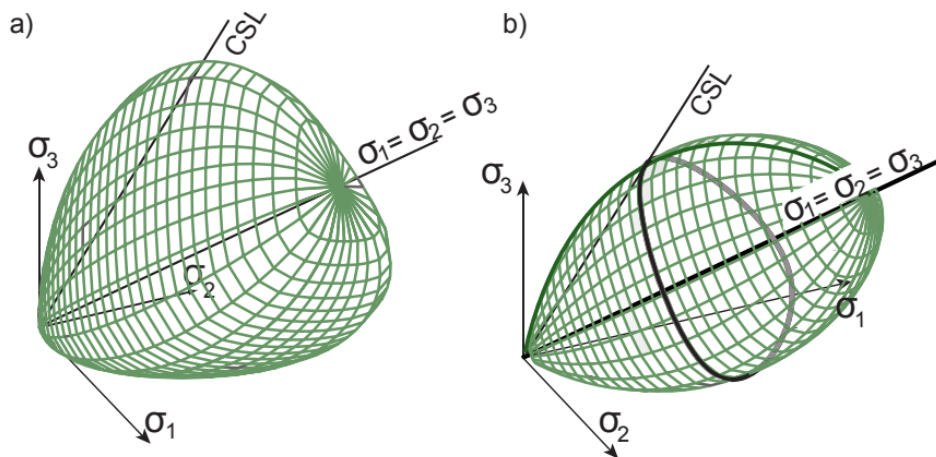
$$F(\boldsymbol{\sigma}) = J_2 - \left(\frac{c'}{\tan(\phi')} + p' \right) M_{JP}$$

Η σχέση αυτή υπολογίζεται για συγκεκριμένη τιμή της γωνίας Lode, με απόδοση την παραπάνω επιφάνεια διαρροής του εδάφους (Σχ. 4.4, b).

4.3 Μοντέλο Αργίλου-Άμμου (Clay and Sand Model, CASM)

Το μοντέλο CASM (Yu, 1998) είναι μία γενίκευση του Cam-Clay μοντέλου (Roscoe and Burland, 1968). Χαρακτηρίζεται από την επιφάνεια διαρροής (Σχ. 4.5) που προκύπτει μέσω της μαθηματικής έκφρασης:

$$F = \left(\frac{\sqrt{3}J_2}{M_\theta p'} \right)^n + \frac{1}{\ln r} \ln \frac{p'}{p'_0} = 0,$$



Σχ. 4.5: Επιφάνεια διαρροής του μοντέλου CASM σε: a) καθεστώς κύριων τάσεων, b) σε επίπεδο p' - q (Yu, 1998)

Στο μοντέλο CASM χρησιμοποιείται ο κανόνας μη συσχετιζόμενης ροής για την κατεύθυνση της πλαστικής παραμόρφωσης, όμοιος με αυτόν που αποκτάται από το βαθμό διαστολής του Rowe. Έπειτα η εξάρτηση της επιφάνειας διαρροής με την πλάστιμη δυνατότητα της γωνίας θ του Lode, θεωρείται μέσω της μαθηματικής έκφρασης της κλίσης M_θ της ευθείας κρίσιμης κατάστασης (Critical State Line, CSL):

$$M_\theta = M_{\theta=-30^\circ} \left(\frac{2\alpha^4}{1 + \alpha^4 + (1 - \alpha^4) \sin 3\theta} \right)$$

με

$$\alpha = \frac{3 - \sin \Phi_{cs}}{3 + \sin \Phi_{cs}}$$

Η έκφραση της M_θ επιτρέπει την κάλυψη της πιο ειδικής περίπτωσης του κριτηρίου Mohr-Coulomb εξαγωνικής επιφάνειας (Sheng *et al.*, 2000) (Σχ. 4.4). Δύο επιπλέον παράμετροι, η χωρική ακτίνα (r) και ο συντελεστής σχήματος (n) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της επιφάνειας διαρροής προς βελτίωση της περιγραφής των εδαφικών σχηματισμών από άμμο και υπερστερεοποιημένη άργιλο. Αυτές οι τροποποιήσεις επιτρέπουν τον έλεγχο, της προ της αστοχίας, διατμητικής αντοχής στην υπερκρίσιμη και υποκρίσιμη πλευρά της ευθείας CSL και την πιθανότητα παραγωγής των παραμέτρων του μοντέλου, χρησιμοποιώντας τις καταστατικές παραμέτρους (Been and Jefferies, 1985) αντί του OCR μέτρου, καθιστώντας την διαδικασία εφαρμόσιμη τόσο στις αργίλους όσο και στις άμμους.

4.4 Αριθμητικό μοντέλο σήραγγας

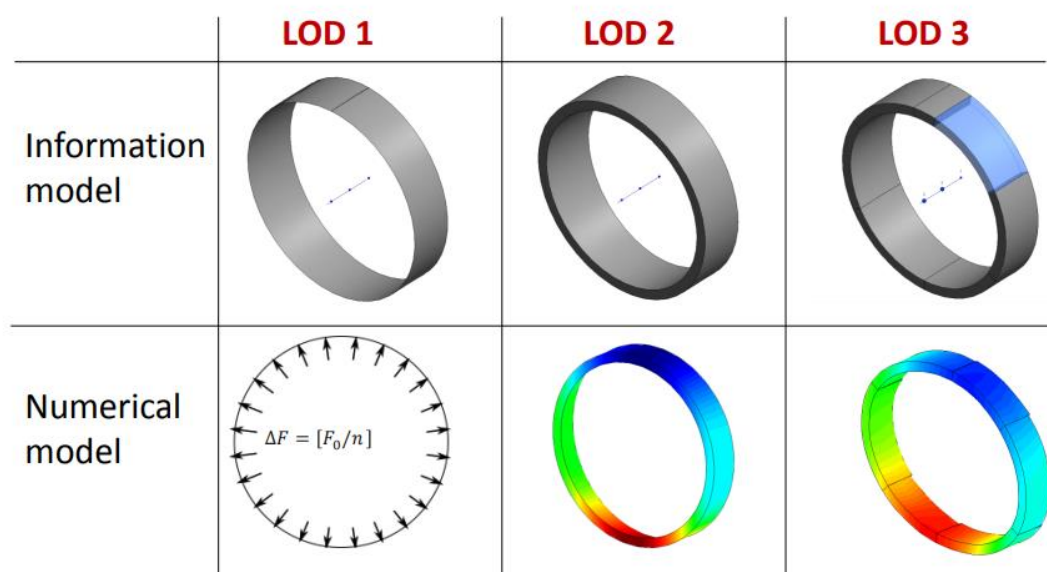
Στα πλαίσια μίας ολοκληρωμένης αριθμητικής ανάλυσης της συμπεριφοράς της κατασκευής της σήραγγας, είναι δόκιμο να εκτελείται η αριθμητική ανάλυση της επιρροής των μηχανικών διατάξεων των στηρίξεων των τεμαχίων και ευρύτερα των δακτυλίων που αποτελούν την δομή της. Για μία τέτοια διαδικασία ανάλυσης εφαρμόζονται εξελιγμένα, στοχευόμενα μοντέλα σήραγγας και στηρίξεων και παρατηρείται η συμπεριφορά τους υπό την επιβολή φορτίων σχεδιασμού, ενώ παράλληλα οι εδαφικές αντιστάσεις προσομοιώνονται από υποκείμενης εδαφικής αντίδρασης, ελατήρια (Arnau and Molins, 2012).

Μάλιστα, υλοποιήθηκε μία πρόσφατη τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση, της δομής της σήραγγας, μέσω του λογισμικού FLAC3D, η οποία συμπεριλαμβάνει την επιρροή στην απόκριση της, τόσο της διάταξης των στηρίξεων ανά τεμάχιο, όσο και ανά δακτύλιο, κατά το μήκος της (Do *et al.*, 2014). Από την διερεύνηση αυτή προέκυψε ότι η συνεισφορά της διάταξης και της δυσκαμψίας των στηρίξεων στις καμπτικές ροπές και στις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στη σήραγγα, είναι σημαντική, αλλά όχι εξίσου στις επιφανειακές καθιζήσεις.

Η σήραγγα ως κατασκευή χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό διατάξεων στήριξης και συναρμογής με διαφοροποίηση κατά μήκος της. Υπάρχουν οι διαμήκεις στηρίξεις της σήραγγας μεταξύ των δακτυλίων και οι στηρίξεις μεταξύ των προκατασκευασμένων τεμαχίων. Η συνολική τους διάταξη έχει σημαντική επιρροή στην συνολική δυσκαμψία της κατασκευής. Οι στηρίξεις έχουν μικρότερη δυσκαμψία συγκριτικά με τα προκατασκευασμένα τεμάχια της σήραγγας, συνεπώς υπόκεινται σε περισσότερες μετακινήσεις έχοντας αντίστοιχα μικρότερη ικανότητα παραλαβής καμπτικής ροπής. Ο κώδικας σχεδιασμού της Ιαπωνικής κοινότητας πολιτικών μηχανικών (Japanese Society of Civil Engineering) συστήνει εμπειρικά τον σχεδιασμό των διατάξεων στήριξης ώστε να αναλαμβάνει το 60-80% της μέγιστης καμπτικής ροπής του κρίσιμου προκατασκευασμένου τεμαχίου σε κάθε δακτύλιο. Έτσι ο πλευρικός περιορισμός από

το έδαφος πρέπει να προσαρμοστεί βάσει ενός προκύπτοντα μειωτικού συντελεστή ροπής (Koyama, 2003).

Μία άλλη εναλλακτική περίπτωση αριθμητικής προσομοίωσης, επιλέγει να μην λαμβάνει υπόψη τη σήραγγα ως δομή δακτυλίων, κατάλληλα συνδεδεμένων τεμαχίων, μέσω διατάξεων και σχέσεων σύζευξης, αλλά προσομοιώνει την σήραγγα με γραμμικά ελαστικά στοιχεία στερεού ή κελύφους, με την ευθυγραμμία της σήραγγας σε όρους τμηματοποίησης, μόνο σε δακτυλίους, κατά το μήκος της (Kasper and Meschke, 2004, Nagel et al., 2010, Lamborghini et al., 2012).



Σχ. 4.6: Απεικονίσεις του παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας (πάνω) και του αριθμητικού προσομοιώματος (κάτω) της σήραγγας, ανά επίπεδο λεπτομέρειας

4.4.1 Αριθμητικό μοντέλο σήραγγας-Επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs) (Σχ. 4.6)

Η διαδικασία προσομοίωσης της σήραγγας σε όρους χαμηλού επιπέδου λεπτομέρειας (LoD1) αφορά ένα μοντέλο δύο διαστάσεων (2D), επίπεδης παραμόρφωσης. Υπό τις συνθήκες αυτές, ένα τέτοιο αριθμητικό μοντέλο, παρακολουθεί την διαδικασία διάνοιξης μέσω μιας απλοποιημένης παραδοχής που επιτρέπει την προ-μετατόπιση του εδάφους που πρόκειται να περιβάλει το σύνορο της εγκατεστημένης σήραγγας, πριν να ληφθεί υπόψη η διαδικασία εγκατάστασης των προκατασκευασμένων δακτυλίων και τεμαχίων της. Οι διαθέσιμες ισοδύναμες προσεγγίσεις που επιτρέπουν την διαδικασία αποσυμπίεσης μέρους του εδαφικού σκελετού, με αποτέλεσμα την παραμόρφωσή του, κατά την διάνοιξη, είναι: η μέθοδος σύγκλισης-συμπίεσης (Panet and Guenot, 1982), η μέθοδος του διανοιγόμενου κενού (Rowe et

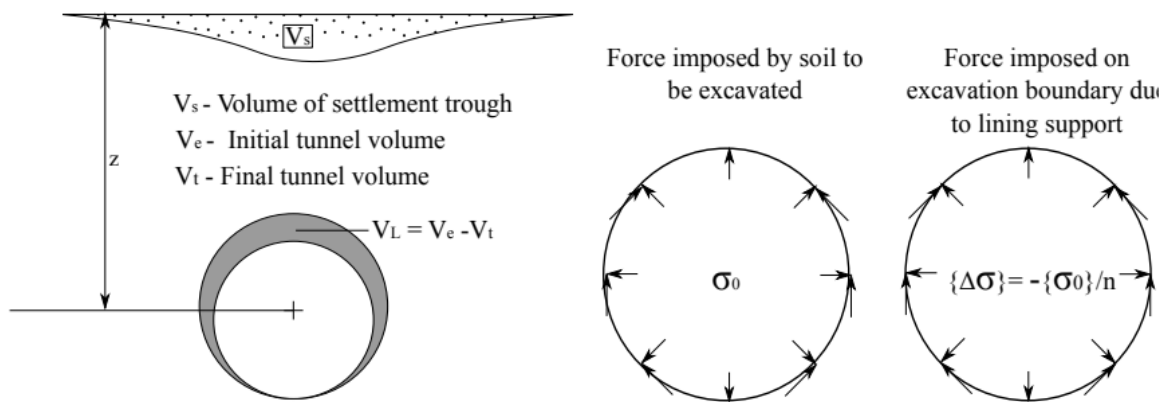
al., 1983), η μέθοδος απομείωσης της δυσκαμψίας (Swoboda, 1979), η μέθοδος υποθετικού μέτρου ελαστικότητας (Powell et al., 1997) και η μέθοδος απώλειας όγκου (Dias et al., 2000).

Ενδεικτικά, η μέθοδος απώλειας όγκου (volume loss) αφορά κυρίως το κωνικό σώμα του μηχανήματος TBM και το φαινόμενο στερεοποίησης του εγχεόμενου ενέματος. Η μορφή και το μέτρο της ακτινικής καθίζησης των τοιχωμάτων της επιφάνειας του διανοιγόμενου εδάφους που συμβαίνει κατά την εκσκαφή, αποδίδει την αντίστοιχη απώλεια όγκου κατά το βήμα διάνοιξης. Ακόμη η μετάδοση των καθιζήσεων αυτών στην επιφάνεια του εδάφους είναι πιθανό να προκαλέσει βλάβες σε ευπαθείς κατασκευές.

Κατά την μέθοδο αυτή η επέλαση του μηχανήματος TBM, η διαδικασία έγχυσης του ενέματος και η φάση στερεοποίησης του, προσομοιώνονται θεωρώντας την αλλαγή της συντομικής συνθήκης της διαμέτρου της εκσκαφής, με αποτέλεσμα την περιγραφή της απώλειας όγκου του εδάφους που προκύπτει. Η μέθοδος υποθέτει ότι η πίεση στο σύνορο της διατομής διάνοιξης, βαθμιαία απομειώνεται (deconfinement) ανά βήμα διάνοιξης και κατ' επέκταση η απώλεια του όγκου που συμβαίνει σε ταυτόχρονο χρόνο μπορεί να προσδιοριστεί, βάσει της απομείωσης αυτής. Ισοδύναμες επικόμβιες εντάσεις (σ_θ) στο σύνορο της διάνοιξης, που αποτελούν τις πιέσεις που επιβάλλονται από το περιβάλλον διανοιγόμενο έδαφος, υπολογίζονται και εν συνεχεία διαιρούνται με το πλήθος βημάτων n που αφορά το στάδιο διάνοιξης. Ίσες και αντίθετες δυνάμεις ($-Δσ$) εφαρμόζονται στο σύνορο σε κάθε βήμα διάνοιξης, για κάθε στάδιο διάνοιξης. Μετά την εγκατάσταση των δομικών στοιχείων της σήραγγας η πίεση ($-Δσ$) συνεχίζει να ασκείται μόνο στα υπόλοιπα μη εγκατεστημένα βήματα (Σχ. 4.7).

Γενικώς έχει αποδειχθεί ότι με τις δισδιάστατες αναλύσεις προκύπτουν λιγότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα καθιζήσεων της επιφάνειας, ακόμη και με απλά καταστατικά μοντέλα εδάφους. Ακόμη είναι σχεδόν αδύνατο να υπολογιστούν τυχόν βλάβες των κατασκευών της επιφάνειας κατά τον άξονα της σήραγγας.

Σημειώνεται ότι η δισδιάστατη (2D) ανάλυση έρχεται σε συμφωνία με την τρισδιάστατη (3D) για συγκεκριμένη επιλογή παραμέτρων του μοντέλου. Ο Dias et al., 2000 ανέπτυξε ένα 3D μοντέλο της διαδικασίας διάνοιξης με το μηχάνημα TBM και ένα 2D, με χρήση της μεθόδου σύγκλισης-συμπίεσης και κατέληξε μετά από σύγκριση των δύο στο γεγονός της ύπαρξης λογικής συμφωνίας των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων μόνο όταν οι κατάλληλοι παράμετροι χρησιμοποιούνταν.



Σχ. 4.7: Μέθοδος απώλειας όγκου (Volume loss method) - Αριθμητική προσομοίωση

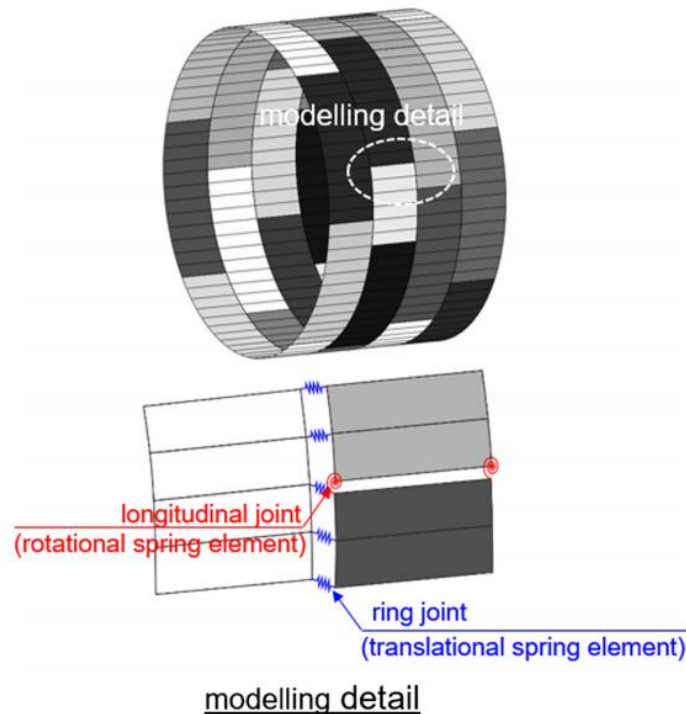
Το μεσαίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD2) αφορά ένα πιο λεπτομερές προσομοίωμα προς ανάλυση της τμηματοποιημένης σε δακτυλίους σήραγγας, το οποίο μοντελοποιείται με όρους στοιχείων όγκου ή κελύφους και πλέον αναπτύσσεται σε τρεις διαστάσεις. Οι δακτύλιοι της σήραγγας εισάγονται ως ατομικοί ανεξάρτητοι όγκοι ή κελύφη και διακριτοποιούνται με πλήθος τρισδιάστατων στερεών ή δισδιάστατων αντίστοιχα, κινηματικών, γραμμικών στοιχείων, μορφής ανάλογης του στόχου της διερεύνησης, διαμορφώνοντας το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της ανάλυσης.

Στο υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD3) η σήραγγα, ως μοντέλο συνεχούς κυλινδρικού κελύφους ή στερεού, με επιμέρους τμηματοποίηση σε τεμάχια (segments) ανά δακτύλιο, φέρει στηρίξεις, στροφικής δέσμησης, διαμήκως μεταξύ των επιμέρους τμημάτων κάθε δακτυλίου και μεταφορικής, περιμετρικώς ανά δακτύλιο (Σχ. 4.8).

Η δυσκαμψία των δακτυλίων εξαρτάται από τον αριθμό των τεμαχίων τους, το προφίλ στηρίξεων τους, τις θλιπτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των τεμαχίων αυτών ανά δακτύλιο, την ποιότητα του υλικού της κατασκευής και τις αναπτυσσόμενες αντιδράσεις μεταξύ των δακτυλίων.

Ένα μοντέλο προσομοίωσης θα μπορούσε να είναι, ένα συνεχές κέλυφος με τμηματοποίηση των δακτυλίων και στοιχεία στήριξης JOINTC κατά το Abaqus (Σχ. 4.8). Οι στηρίξεις αυτές είναι κατάλληλες για μικρές στροφικές παραμορφώσεις και αφορούν σχέση αλληλοεπίδρασης μεταξύ δύο γεωμετρικά τυχαίων κόμβων. Αποτελούν στηρίξεις με εσωτερική δυσκαμψία ελατηρίου και/ή απόσβεση, κατά τέτοιον τρόπο ώστε ο διαδοχικά επόμενος τυχαίος κόμβος να μετακινείται συμβαδίζοντας με την μετακίνηση του προηγούμενου. Αυτή η συμπεριφορά αλληλοεπίδρασης κόμβων απαιτεί έξι μεταβλητές δυσκαμψίας, τρεις στροφικές και τρεις μεταφορικές. Ωστόσο, έμφαση δίνεται στην στροφική δυσκαμψία για τις διαμήκεις στηρίξεις και στην διατμητική δυσκαμψία για τις περιμετρικές των δακτυλίων. Σε όλες τις άλλες μεταβλητές μεταφορικής

δυσκαμψίας, ανατίθεται υψηλή δυσκαμψία ώστε να υπάρχει απόλυτη επαφή και μεταβίβαση τάσεων. Οι υπόλοιπες στρωφικές δυσκαμψίες, έπειτα από παραμετρικές αναλύσεις που τις έχουν συμπεριλάβει, διαπιστώθηκε ότι δεν έχουν κρίσιμο ρόλο στην όλη διαδικασία.



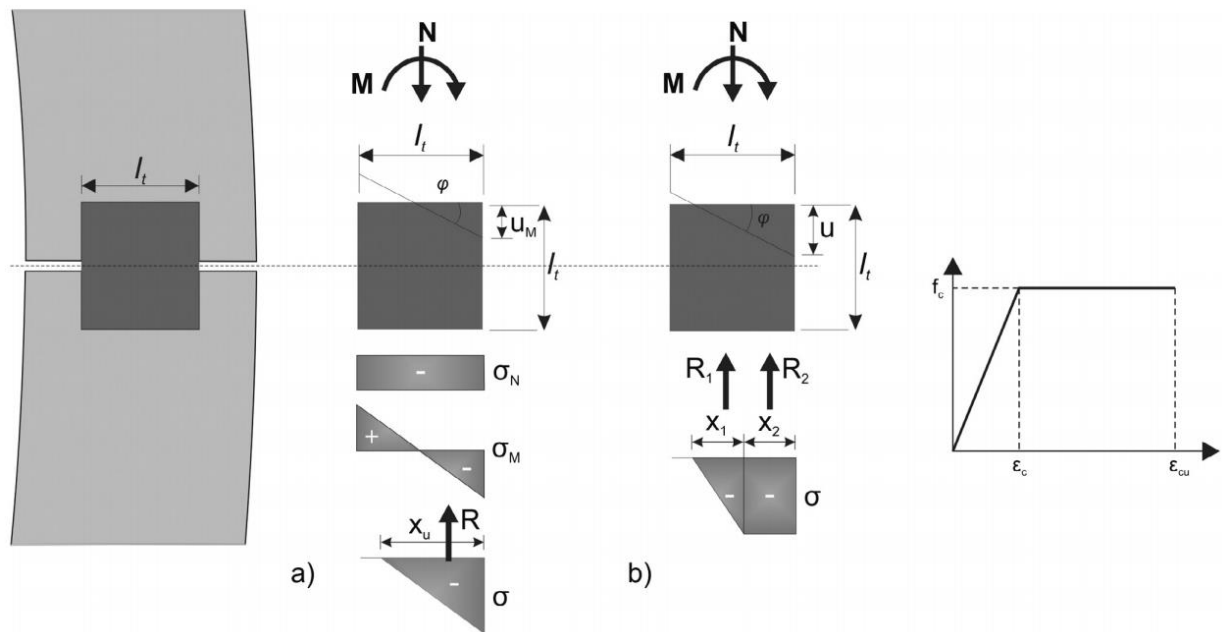
Σχ. 4.8: Ενδεικτική λεπτομέρεια απεικόνισης αριθμητικής προσομοίωσης της διάταξης μηχανικών στηρίξεων της σήραγγας σε περιβάλλον Abaqus. Οι διαμήκεις στηρίξεις και οι στηρίξεις της περιφέρειας των δακτυλίων μοντελοποιούνται ως στρωφικά και μεταφορικά ελατήρια, αντίστοιχα, μέσω στοιχείων τύπου JOINTC. **Πηγή:** Kanvadas M., Litsas D., Vazaios I., Fortsakis P., 2017, Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling - ScienceDirect

Οι διαμήκεις στηρίξεις υπάρχουν μεταξύ των προκατασκευασμένων τμημάτων στον κάθε δακτύλιο. Οι σήραγγες ως κατασκευές καταπονούνται από καθαρή θλίψη ως κύρια φόρτιση και ακολούθως οι στηρίξεις λειτουργούν επίσης, κυρίως υπό πίεση θλίψης. Στις αβαθείς/ρηχές σήραγγες, όπου η καταπόνηση από θλίψη είναι χαμηλότερη, συνακόλουθα η δυσκαμψία των στηρίξεων, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την καταπόνηση, είναι επίσης μικρότερη (Litsas et al 2015). Η στρωφική δυσκαμψία των στηρίξεων αυτών, εξαρτάται από το μήκος επιφάνειας επαφής (l_l), το πάχος των τεμαχίων των δακτυλίων (b), τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού των στηρίξεων (E_c, f_c σκυροδέματος) και το μέτρο της καμπτικής ροπής (M). Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι προσδιορισμού της στρωφικής δυσκαμψίας των διαμηκών στηρίξεων. Μία εξ αυτών, αφορά την θεώρηση γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού τους (Janssen,

1983) με βελτιωμένη συμπεριφορά, τελείως πλαστική (Blom, 2002) η οποία εν τέλει καταλήγει να χωρίζεται σε δύο στάδια (Σχ. 4.9):

Στάδιο 1: Γραμμική ελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος, μέσω πλήρους επαφής των στηρίξεων, για τον υπολογισμό της γραμμικής στρωφικής δυσκαμψίας και με σταδιακό χάσιμο επαφής τους που καθιστά τον υπολογισμό μη γραμμικής στρωφικής δυσκαμψίας.

Στάδιο 2: Το σκυροδέμα στο στάδιο αυτό έχει εισέλθει στον πλαστικό κλάδο. Η επαφή των στηρίξεων έχει μερικώς χαθεί και η στρωφική δυσκαμψία είναι μη γραμμική. Τότε συμβαίνει συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων και εμφάνιση θλιπτικών παραμορφώσεων μεγέθους ($\epsilon = \epsilon_{cu}$) στο θλιβόμενο άκρο της επαφής.



Σχ. 4.9: Διεπιφάνεια διάταξης διαμήκους στήριξης, επιφάνειας επαφής μήκους (l_t) (Luttikholt, 2007). Αναπτυσσόμενες τάσεις στην διεπιφάνεια επαφής για: a) γραμμική ελαστική συμπεριφορά σκυροδέματος, b) πλαστική συμπεριφορά του υλικού σκυροδέματος (Blom, 2002).

Η επαφή μεταξύ παρακείμενων δακτυλίων συμβαίνει μέσω συνδέσμων (μπουλόνια, πείρους, σφήνες) οι οποίοι βελτιώνουν την στρωφική δυσκαμψία της δακτυλοειδούς διάταξης καθώς το μέγεθός της είναι σχετικά μικρό, όπως αντίστοιχα και η θλιπτική καταπόνηση των συνδέσμων. Όταν η μέγιστη καμπτική ικανότητα των στηρίξεων του δακτυλίου αναπτυχθεί, τότε κομβικό ρόλο στην ανάληψη και μεταφορά καμπτικών ροπών μεταξύ των γειτονικών δακτυλίων κατέχει η διατμητική συμπεριφορά της επιφάνειας επαφής. Η συνολική διατμητική δυσκαμψία αφορά

τον συνδυασμό μεταξύ εκείνης των συνδέσμων και των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ των επιφανειών επαφής. Η τιμή του συντελεστή τριβής στην επιφάνεια επαφής θεωρείται $\mu=0.25-0.30$, τιμή που όμως τελεί υπό εξέταση ακόμη (STUVA, 1996).

Λόγω της παρουσίας των μηχανικών διατάξεων στήριξης, συμβαίνει η απομείωση της συνολικής δυσκαμψίας της σήραγγας, που πλέον δεν αποτελεί μια συνεχή, ενιαίας δυσκαμψίας, δομή. Για την προσομοίωση μιας εκ τεμαχίων εγκατάστασης, ανά δακτύλιο της σήραγγας, που φέρει στηρίξεις, συστήνεται ένα μοντέλο διαμηκών και δακτυλιοειδούς παράθεσης στηρίξεων για το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης. Η απομείωση της δυσκαμψίας της σήραγγας λόγω της παρουσίας των στηρίξεων μοντελοποιείται εισάγοντας εγκάρσιες στηρίξεις και γεωμετρίες στοιχείων δοκού, ανάμεσα στους δακτυλίους, που αναπαριστούν τους πραγματικούς συνδέσμους (μπουλόνια) με απλή παράθεση σύνδεσης, επιφάνειας προς επιφάνεια (surface to surface normal contact) για κάθε τεμάχιο δακτυλίων. Τα μπουλόνια ενσωματώνονται με τα τεμάχια των δακτυλίων που αποτελούν στερεά στοιχεία και οι συνθήκες συνδέσμου επιβάλλονται μεταξύ των σημείων ολοκλήρωσης των στοιχείων δοκού και αυθαίρετων σημείων του στερεού στοιχείου των τεμαχίων με τις ίδιες καθολικές συντεταγμένες. Μία επιπλέον συνθήκη κανονικής σύνδεσης ανάμεσα στις διατομές μετώπων των τεμαχίων τόσο κατά τη διαμήκη όσο και κατά την εγκάρσια διεύθυνση αποτρέπει την διείσδυση του ενός όγκου στον άλλο.

4.5 Αριθμητικό μοντέλο κτιρίων

Σε ορισμένες περιπτώσεις το ενδιαφέρον της αριθμητικής ανάλυσης δεν επικεντρώνεται στην λεπτομερή κατανομή των τάσεων στα μέλη της κατασκευής αλλά αρκούν οι κατανομές μέσων τιμών μεγεθών όπως οι καμπτικές ροπές, οι αξονικές και οι τέμνουσες δυνάμεις. Ωστόσο, η ακρίβεια της συνολικής απόκρισης των κατασκευών διατηρείται. Αν το ζητούμενο είναι οι καθιζήσεις του εδάφους ως αποτέλεσμα της αλληλοεπίδρασης της διαδικασίας διάνοιξης με τις κατασκευές της επιφάνειας, αντί της διερεύνησης της επιρροής των καθιζήσεων σε ενδεχόμενες βλάβες των κατασκευών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελλιπή μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης των κτιρίων. Σε άλλη περίπτωση, αν ο στόχος είναι η πρόσβαση στην πληροφορία της επίδρασης της διάνοιξης, στην απόκριση των κτιρίων απαιτούνται πιο αναλυτικά μοντέλα.

Η επιλογή του μοντέλου κτιρίων όσον αφορά το επίπεδο λεπτομέρειας γίνεται με στόχο την μη εισαγωγή επιπρόσθετων βαθμών ελευθερίας στο προσομοίωμα, προς μία λιγότερο επιβαρυσμένη ανάλυση υπολογιστικά και χρονικά. Για τον λόγο αυτό, όπως έχει προαναφερθεί είναι σημαντικό να γίνεται ο κατάλληλος συνδυασμός των μοντέλων σε όρους επιπέδου λεπτομέρειας προς επίτευξη του επιθυμητού στόχου.


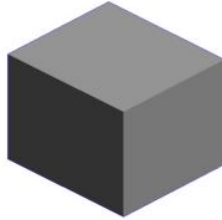
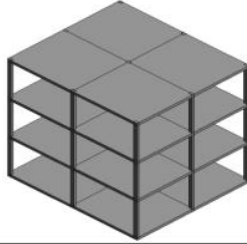
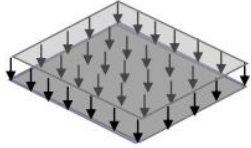
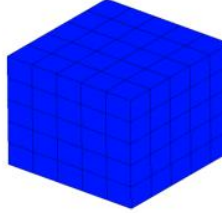
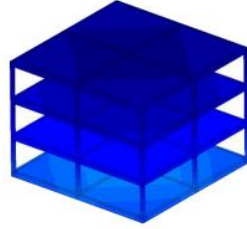
4.5.1 Αριθμητικό μοντέλο κτιρίων-Επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs)(Σχ. 4.10)

Σε μία αριθμητική προσομοίωση χαμηλού επιπέδου λεπτομέρειας (LoD1) τα κτίρια της επιφάνειας αντικαθίστανται, σαν σχεδιασμός και κατασκευή, από ένα νεκρό φορτίο εκ του ιδίου βάρους τους, το οποίο ασκείται άμεσα στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ αμελείται η έννοια της

αλληλοεπίδρασης τους με το έδαφος. Ουσιαστικά το μοντέλο αποτελείται από κτίρια σε όρους επιβολής επιπρόσθετων τάσεων στο έδαφος λόγω ιδίου βάρους.

Τα κτίρια στο μεσαίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD2) θεωρούνται ως ελλιπή μοντέλα, όπως έχει προαναφερθεί, με υποκατάστατο μέτρο ελαστικότητας (E), ύψος (H) και μάζα μέσω της ιδιότητας της πυκνότητας (ρ). Στο επίπεδο αυτό χρησιμοποιούνται για το υπολογιστικό στάδιο ισότροπα, κινηματικά, γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία στερεού, μορφής ανάλογης του στόχου της διερεύνησης. Τα στοιχεία αυτά φέρουν αντίστοιχες κατασκευαστικές ιδιότητες και αλληλεπιδρούν με το έδαφος μέσω ενός ανεξάρτητου, σε όρους δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, συνδέσμου με ιδιότητα σύνδεσης επιφάνειας με επιφάνεια (surface to surface), ο οποίος αποτρέπει την διείσδυση του ενός υλικού στο άλλο, εν προκειμένω της θεμελίωσης εντός του εδάφους. Ακόμη, είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη μηχανισμοί αλληλεπίδρασης σχετικά με τον τρόπο παραμόρφωσης των κτιρίων ως μηχανικά ανάλογα δοκών (hogging/sagging).

Κατά το υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD3) τα κτίρια αναπαρίστανται λεπτομερώς με τα συστατικά τους μέρη και περιλαμβάνεται τη συνολική επίδραση αλληλεπίδρασης τους με το έδαφος. Τα κτίρια μοντελοποιούνται ως πλήρη δομικά πλαίσια με δοκούς, υποστυλώματα και πλάκες, τα οποία αποτελούνται κατά το υπολογιστικό στάδιο από ισότροπα κινηματικά γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία στερεού, μορφής ανάλογης του στόχου της διερεύνησης. Προς απόκτηση ελέγχου του αριθμού των βαθμών ελευθερίας του προσομοιώματος χρειάζεται η παραγωγή ενός προσαρμοσμένου στην κατασκευή, δικτύου διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω του γεγονότος ότι η θεμελίωση των κτιρίων κατέχει θεμελιώδη ρόλο στην μετάδοση της επίδρασης των εδαφικών παραμορφώσεων στον σκελετό τους, για την προσομοίωση τέτοιων σχετικών μετακινήσεων μεταξύ εδάφους και θεμελίωσης εισάγεται ένας σύνδεσμος με συνθήκες επαφής επιφάνειας με επιφάνεια.

	LOD 1	LOD 2	LOD 3
Information model			
Numerical model			

Σχ. 4.10: Απεικονίσεις του παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας (πάνω) και του αριθμητικού προσομοιώματος (κάτω) των κτιρίων, ανά επίπεδο λεπτομέρειας

4.6 Αριθμητικό μοντέλο ενέματος

Στην τυπική λειτουργία του μηχανήματος TBM κατά τη διαδικασία διάνοιξης, εγχέεται ένεμα σκυροδέματος στο πέρας της ασπίδας, κατά το στάδιο εμφάνισης του πιο πρόσφατα εγκατεστημένου δακτυλίου, συμπληρώνοντας το σχηματιζόμενο εκ της εκσκαφής κενό και δημιουργώντας την κατάλληλη αρμολόγηση. Η παρουσία του ενέματος προστατεύει και στεγανοποιεί το εσωτερικό περιβάλλον της σήραγγας και συμβάλλει στην πιο ομαλή επικοινωνία και αλληλεπίδραση της με το έδαφος.

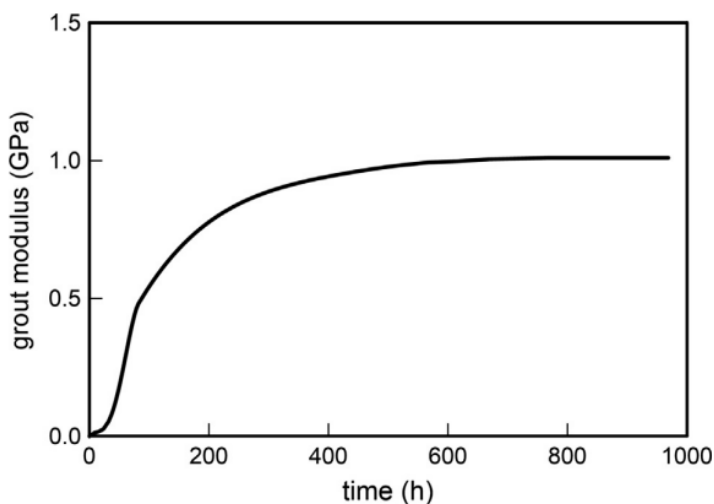
Έχει αποδειχθεί ότι η ενεμάτωση του διανοιγόμενου κενού έχει σημαντική επίδραση στην μεταβολή του τασικού πεδίου, τοπικά και συνεπώς συμβάλλει σημαντικά στις επιφανειακές καθιζήσεις του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, η επανακατανομή του κονιάματος του ενέματος εντός του δακτυλιοειδούς κενού και η μετάσταση που υφίσταται χρονικά, από υγρό κονίαμα σε μια σκληρυμένη στερεή κατάσταση, μέσω ενός φαινομένου ενυδάτωσης, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην διατήρηση της τασικής κατάστασης του περιβάλλοντος εδάφους και στον έλεγχο των καθιζήσεων. Για τον λόγο αυτό εξίσου σημαντική είναι η παρουσία του και η διαδικασία εφαρμογής του στα αριθμητικά προσομοιώματα.

Μία πρόσφατη μελέτη διερεύνησης, προτείνει μία εκδοχή τεχνικής αριθμητικής προσομοίωσης της διαδικασίας διάνοιξης η οποία επικεντρώνεται στην λεπτομερή μοντελοποίηση έγχυσης ενέματος στο διανοιγόμενο κενό, ως θεώρηση ότι η παρουσία του και η διαδικασία έγχυσης και σκλήρυνσης του, αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα επιρροής εδαφικών απωλειών και καθιζήσεων. Κατά αυτή την προσέγγιση δεν εισάγεται καμία αυθαίρετη

διαταραχή στο σύνορο της διανοιγόμενης επιφάνειας ούτε συμβαίνει κάποιο καλιμπράρισμα ιδιοτήτων κάποιου πλασματικού υλικού που θα συμμετείχε αποκλειστικά και μόνο για την προσομοίωση (Kavvadas *et al.*, 2017).

Σε ένα αριθμητικό μοντέλο η διαδικασία έγχυσης, προσομοιάζεται με δκομβικά, εξάεδρα στοιχεία στερεού, ενέματος, με αρχική εσωτερική ομοιόμορφη πίεση προδιαγραφών. Με την πάροδο του χρόνου, το μέτρο ελαστικότητας του ενέματος αυξάνεται (ιδιότητα σκλήρυνσης) και έτσι συμβαίνει μείωση της αρχικής εσωτερικής του πίεσης, κατά την αύξηση της απόστασης από το αρχικό σημείο έγχυσης. Το φαινόμενο αυτό παρακολουθείται με την εφαρμογή ενός καταστατικού μοντέλου προσομοίωσης, στο αριθμητικό μοντέλο, που συμπεριλαμβάνει την χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά του υλικού του ενέματος.

Η απόκριση του ενέματος χαρακτηρίζεται ως ελαστική με λόγο Poisson $\nu=0.2$ και επιδρά στην συμπίεστικότητα όγκου, με μέτρο (bulk modulus) περίπου ίσο με το μισό μέτρο ελαστικότητας. Η χρονικά μεταβαλλόμενη σκλήρυνση του ενέματος βασίζεται στην καμπύλη των Kasper and Meschke, 2004 (Σχ. 4.11). Τυπικά, για το φαινόμενο σκλήρυνσης του ενέματος, φαίνεται να εφαρμόζει μία μέση τιμή βήματος προόδου της διάνοιξης των 18m/ημέρα. Η δυσκαμψία των στοιχείων που προσομοιάζουν το ένεμα υπολογίζονται στο στάδιο της απαραμόρφωτης διαμόρφωσής τους βάσει του αρχικού πάχους του σχηματιζόμενου κενού, αμελώντας τη σταδιακή συμπλήρωσή του και σύγκλιση του εδάφους προς τη σήραγγα.



Σχ. 4.11: Χρονικά μεταβαλλόμενη ιδιότητα σκλήρυνσης του ενέματος (Kasper and Meschke, 2004)

Η εσωτερική πίεση του ενέματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μία διφασική ιδιότητα έκφρασης, όμοια με αυτή του μοντέλου εδάφους. Η διαδικασία ενυδάτωσης περιγράφεται από

χρονικά εξαρτώμενες ιδιότητες του υλικού τόσο για το χαρακτηριστικό της αντοχής όσο και για αυτό της διαπερατότητας. Η έκφραση αυτή είναι βασισμένη στο ανάλογο μοντέλο ενυδάτωσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος (*Meschke et al., 1996*). Στο μοντέλο αυτό η συνολική παραμόρφωση ε επιμερίζεται σε μία αρχική παραμόρφωση ε^0 , στον όρο της ελαστικής παραμόρφωσης ε^{el} και στην μη αναστρέψιμη παραμόρφωση (παραμένουσα παραμόρφωση) λόγω της χρονικά μεταβαλλόμενης ενυδάτωσης του ενέματος ε^t .

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^t + \varepsilon^0$$

Ο καταστατικός νόμος που διέπει την διαδικασία του μοντέλου είναι παραλλαγή του γραμμικού ελαστικού νόμου του Hooke με την παράμετρο του μέτρου ελαστικότητας (E), που προκαλεί την μη αναστρέψιμη παραμόρφωση ε^t , να είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, προσεγγίζοντας το φαινόμενο ενυδάτωσης του ενέματος. Υποθέτοντας ότι ο βαθμός μεταβολής της τάσης συνδέεται γραμμικά με εκείνον της παραμόρφωσης σε όρους ενός χρονικά μεταβαλλόμενου τανυστή C του υλικού, η σχέση τάσης παραμόρφωσης σε ότι αφορά το ένεμα ορίζεται μέσω της παραμόρφωσης ε^t και του τανυστή του υλικού 28 ημερών $C^{(28)}$, ως:

$$(a) \dot{\sigma}^t = C : \dot{\varepsilon}^t \quad \text{where} \quad (b) C = C^{(28)} \frac{E(t)}{E(28)}$$

Η σχέση που αποδίδει τις μόνιμες παραμορφώσεις για χρονικό βήμα Δt , είναι:

$$\Delta \varepsilon^t = \left(1 - \frac{\xi}{E^{(28)} \Delta t}\right) \Delta \varepsilon$$

Στο τέλος ενός χρονικού βήματος υπολογίζεται η αναπτυσσόμενη τάση, σε όρους του τανυστή $C^{(28)}$ και η συνολική παραμόρφωση ε , διορθωμένη βάσει της σχέσης για τις μόνιμες παραμορφώσεις.

Η ενυδάτωση του ενέματος μοντελοποιείται υποθέτοντας την χρονικά εξαρτώμενη ιδιότητα διαπερατότητας του η οποία ακολουθεί εκθετική κατανομή μεταξύ της αρχικής τιμής $k^{(0)}$ και της τιμής των 28 ημερών $k^{(28)}$ κατά τον εκθετικό συντελεστή μεταβολής β :

$$k(t) = (k^{(0)} - k^{(28)})e^{-\beta_{grout}t} + k^{(28)}$$

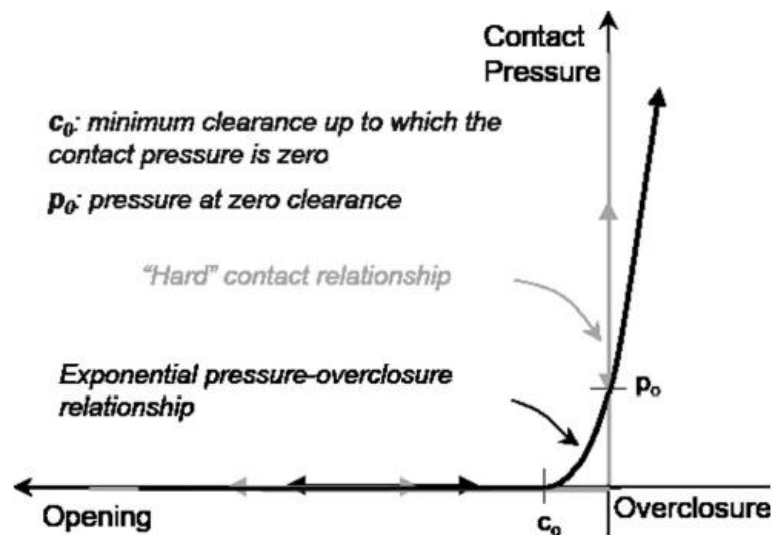
Χρησιμοποιώντας μία τέτοια έκφραση είναι δυνατό να εκτιμηθεί και να αποδοθεί η μεταβολή της εσωτερικής πίεσης του ενέματος κατά την εφαρμογή του ανά βήμα διάνοιξης και η περιγραφή των ισοδύναμων, συνοριακών συνθηκών πίεσης για το εν λόγω υλικό.

4.7 Αριθμητικό μοντέλο μηχανήματος TBM

Λόγω της χαλάρωσης του εδάφους (διαταραχή και απώλεια εδαφικού όγκου) και των χαρακτηριστικών της εκσκαφής και του μηχανήματος διάνοιξης TBM συμβαίνουν προμετατοπίσεις στην επιφάνεια διάνοιξης. Σε ένα πρώτο βήμα, το έδαφος και η ασπίδα του TBM δεν βρίσκονται σε επαφή, λόγω των ανοχών (overcut) που δημιουργούνται από το μέτωπο διάνοιξης και το κωνικό σχήμα της ασπίδας, οπότε η πίεση στην διεπιφάνεια τους είναι μηδενική. Σε ένα δεύτερο βήμα, το κενό κλείνει (overclosure) με αποτέλεσμα η ασκούμενη πίεση στη διεπιφάνεια να αυξάνεται ραγδαία (επαφή) (Σχ. 4.12). Όσο η διάνοιξη αναπτύσσεται και το μηχάνημα κινείται, οι πιέσεις του εδάφους στην ασπίδα μειώνονται λόγω της κωνικότητάς της. Τελικώς, με την έγχυση του ενέματος το έδαφος δέχεται πιέσεις και μετακινείται ελαφρώς προς τα επάνω.

4.7.1 Αριθμητικό μοντέλο μηχανήματος TBM - Επίπεδα λεπτομέρειας (LoDs)(Σχ. 4.13)

Η κύρια λειτουργία της ασπίδας του μηχανήματος στην αριθμητική προσομοίωση χαμηλού επιπέδου λεπτομέρειας (LoD1) είναι να αποτρέπει την σύγκλιση του υλικού της περιβάλλουσας διανοιγόμενης επιφάνειας. Κατά συνέπεια ορισμένοι μελετητές παρουσιάζουν την εξωτερική επιφάνεια της ασπίδας του μηχανήματος TBM ως συνοριακή συνθήκη περιορισμού και οριοθέτησης των παραμορφώσεων της επιφάνειας αυτής (Founta et al., 2013). Κατά την προσέγγιση αυτή η ασπίδα του μηχανήματος αναπαρίσταται από ένα σετ n στο πλήθος επιμήκων τμημάτων, μήκους (L_r, m) και μορφής δακτυλίων, όπου $n=L_{TBM}/L_r$. Στα τμήματα αυτά, οι δακτύλιοι σχηματίζονται μέσω μιας ομοιόμορφης ακτινικής μεταβολής κατά μήκος ώστε τα σύνορα τους να παρακολουθούν την ιδιότητα της κωνικότητας της επιφάνειας της ασπίδας του μηχανήματος TBM.



Σχ. 4.12: Σχέση εκθετικής αύξησης της πίεσης στην διεπιφάνεια διάνοιξης κατά τη σύγκλιση του εδάφους – Σχέση αύξησης της πίεσης υπό συνθήκες επαφής (overclosure) (Abaqus, 2011). **Πηγή:** Kanvadas M., Litsas D., Vazaios I., Fortsakis P., 2017, Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling - ScienceDirect

Υπάρχουν ισοδύναμες προσεγγίσεις μοντελοποίησης του μηχανήματος TBM χωρίς φυσικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της ασπίδας. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει αριθμητική αλληλεπίδραση με το έδαφος και έτσι μετά από κάθε βήμα διάνοιξης, το έδαφος αφήνεται να παραμορφωθεί ελεύθερα γύρω από το μηχάνημα και υπολογίζονται οι μετατοπίσεις του εδάφους σε κόμβους γύρω από αυτό. Αν οι μετατοπίσεις αυτές υπερβούν το όριο της τιμής του κενού που σχηματίζεται, τότε παγιώνονται στην τιμή που εκφράζει το κενό.

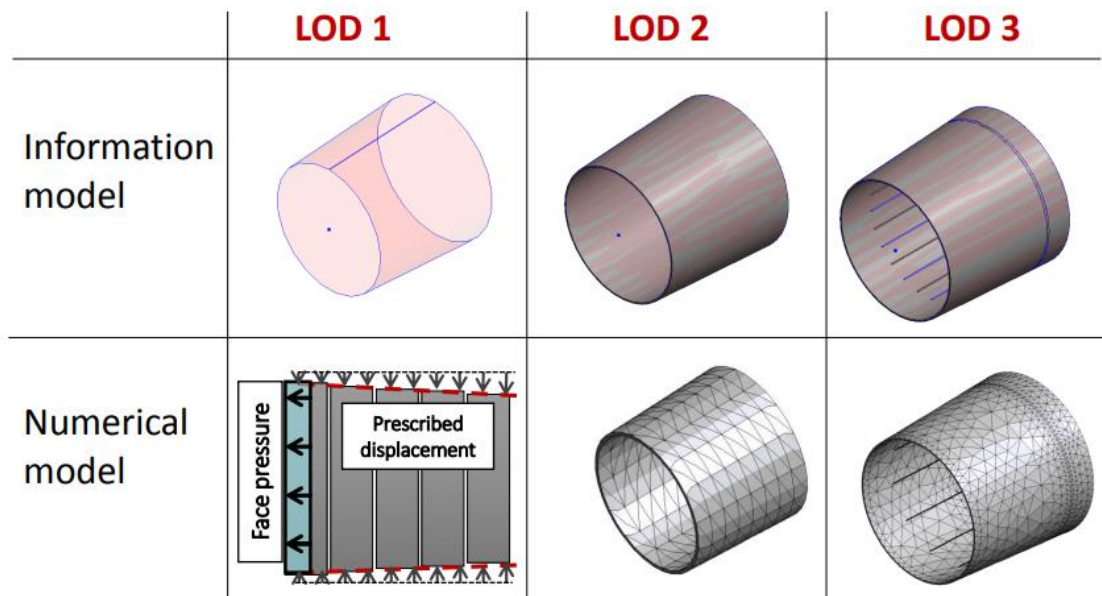
Κατά το μεσαίο επίπεδο λεπτομέρειας (LoD2) το μηχάνημα TBM μοντελοποιείται ως παραμορφώσιμο στερεό σώμα, κινούμενο προοδευτικά εντός του εδάφους και έχοντας με αυτό σχέση αλληλεπίδρασης, μέσω συνδέσμου επιφάνειας με επιφάνεια. Με αυτή την διαδικασία μοντελοποίησης η απώλεια όγκου κατά την διάνοιξη παρακολουθεί σχεδόν κατά φυσικό τρόπο το πραγματικό φαινόμενο που οφείλεται στο χαρακτηριστικό της κωνικότητας της ασπίδας και στην ανοχή κοπής. Η ανάπτυξη τριβής στην διεπιφάνεια μεταξύ της ασπίδας και του εδάφους κατέχει σημαντικό ρόλο στην ανακατανομή των τάσεων και της υπερπίεσης των πόρων. Μία μορφή σύνδεσης των δύο μοντέλων είναι σε όρους επιφάνειας με επιφάνεια κατά τον τύπο επαφής επιφανειών του (Laurssen, 2002). Αυτός ο τύπος επαφής επιβάλλει έναν γεωμετρικό περιορισμό μεταξύ του σώματος που έρχεται σε επαφή (slave) και του σώματος με το οποίο έρχεται σε επαφή (master), ελέγχοντας την αλληλεπίδραση τους εφόσον έχουν ανεξάρτητες παραμορφώσεις. Ο συγκεκριμένος τύπος επαφής αντιμετωπίζει επίσης και το ζήτημα της κατάστασης ολίσθησης μεταξύ των δύο επιφανειών, κατάσταση που απαιτεί ειδική αντιμετώπιση. Η ολίσθηση αποτυπώνεται ως η σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο επιφανειών

επαφής. Η συνολική απόκριση με ύπαρξη τριβής εισάγεται με χρήση του νόμου τριβής Coulomb που αναφέρει ότι η εφαπτομενική μετατόπιση u_T είναι ανάλογη της εφαπτομενικής τάσης σ_T αν ισχύει η σχέση:

$$u_T \geq \mu \sigma_N$$

Σε κάθε άλλη περίπτωση ισχύει ότι $u_T=0$ (Laurson, 2002).

Στο υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας (LoD3), η πρόοδος διάνοιξης του μηχανήματος TBM γίνεται μέσω της ώθησης του προς τα εμπρός από κατάλληλη διάταξη υδραυλικών ωθητικών γρύλων και το έδαφος εκσκάπτεται από τον περιστρεφόμενο δίσκο του μετώπου που φέρει διατάξεις κοπής. Μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση, αφορά την αλληλεπίδραση του μηχανήματος TBM με το έδαφος κατά την καθοδήγηση του σε ενδεχόμενες καμπύλες ευθυγραμμίες. Η καθοδήγηση του μηχανήματος TBM γίνεται μέσω της διαφορικής προώθησης των υδραυλικών γρύλων (hydraulic jacks). Προς αποφυγήν παρέκκλισης της πορείας του κατά τη διάνοιξη, μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλος αλγόριθμος ο οποίος ελέγχει σε ατομικό επίπεδο τις διαφορικές ωθήσεις των υδραυλικών γρύλων (Kasper and Meschke, 2006). Όπως και στο μεσαίο επίπεδο μεταξύ των διεπιφανειών του μηχανήματος TBM και του εδάφους, εφαρμόζεται ο τύπος επαφής μέσω τριβής, επιφάνειας με επιφάνεια.



Σχ. 4.13: Απεικονίσεις του παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας (πάνω) και του αριθμητικού προσομοιώματος (κάτω) του μηχανήματος διάνοιξης TBM, ανά επίπεδο λεπτομέρειας

4.8 Αριθμητικό μοντέλο διαδικασίας διάνοιξης

Η διαδικασία διάνοιξης της μηχανοποιημένης σήραγγα, περιλαμβάνει επαναληπτικά βήματα διάνοιξης, κατά τα οποία συμβαίνουν αρκετές διαδοχικές ενέργειες (υπό-βήματα). Οι ενέργειες

αυτές που αφορούν την διαδικασία διάνοιξης, συγκεκριμένα για τη μέθοδο EPB (Earth Pressure Balance) πρέπει να μοντελοποιούνται ορθά κατά την διαδικασία ανάλυσης και ανά βήμα διάνοιξης είναι οι εξής (Σχ. 4.14):

- Ανάπτυξη της διαδικασίας κατά βήμα ίσο με το μήκος ενός δακτυλίου, με ταυτόχρονη αφαίρεση εδαφικής μάζας θέσης 'n' στο μέτωπο της διάνοιξης.
- Στην νέα διατομή εδάφους, προς διάνοιξη, που αντικρίζει το μηχάνημα ($n+1$) εφαρμόζεται κατάλληλη ποσότητα πίεσης, καθώς στην περιοχή δημιουργούνται συνθήκες διατάραξης του αλληλεπιδρώντος εδάφους, κάτι που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια του μηχανήματος TBM.

Κατά τη διαδικασία διάνοιξης με τη μέθοδο EPB, καθώς το μηχάνημα TBM εκσκάπτει, συλλέγει παράλληλα εντός του θαλάμου εκσκαφής (excavation chamber) το εκσκαπτόμενο υλικό (spoil) το πλεόνασμα του οποίου απομακρύνεται μέσω μίας διάταξης αναστροφου κοχλιομεταφορέα με ελεγχόμενο ρυθμό, εξαρτώμενο από την ταχύτητα διάνοιξης και ώθησης του μηχανήματος.

Οι κλειστού τύπου ασπίδες EPB χρησιμοποιούν το υλικό εκσκαφής για να παρέχουν πίεση υποστήριξης στο μέτωπο διάνοιξης (cutterhead). Το εκσκαπτόμενο υλικό αντισταθμίζει σχεδόν πλήρως και κατά φυσικό τρόπο την εδαφική πίεση και την πίεση του νερού. Η διαδικασία εξισορρόπησης λειτουργεί πολύ καλά για συνεκτικά εδάφη χαμηλής διαπερατότητας. Η πίεση εξισορρόπησης ρυθμίζεται μέσω της εξόρυξης από τον κοχλιομεταφορέα αλλά και μέσω έγχυσης βελτιωτικών προσμίκτων στην διατομή εκσκαφής προς ανάμιξη του υλικού του θαλάμου εκσκαφής, όταν απαιτείται.

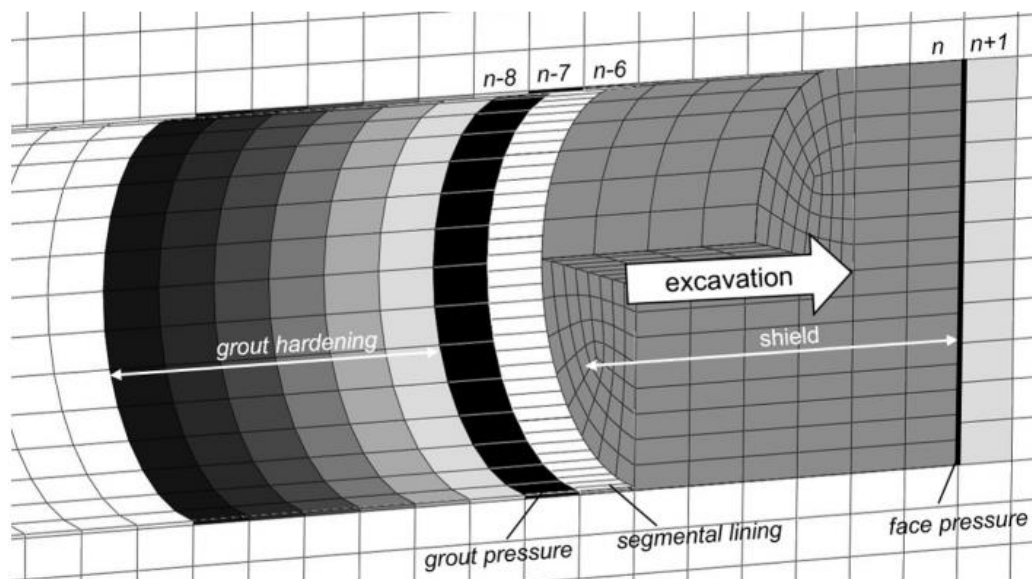
Στην μέθοδο EPB το διάφραγμα του μηχανήματος διατηρεί το υλικό εντός του θαλάμου εκσκαφής και το συγκρατεί σε συνδυασμό με την περιμετρική ασπίδα, ώστε να είναι σε θέση να αντισταθμίσει τις εδαφικές πιέσεις σε όρους ολικών τάσεων. Το υλικό αυτό, σε ότι αφορά την σύστασή του, προσαρμόζεται ανάλογα με την εδαφική απόθεση προς εκσκαφή και πρέπει να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες για να είναι σε θέση να παρέχει αποδοτική πίεση υποστήριξης.

Σε ένα διευρυμένο εύρος εφαρμογής της μεθόδου που αφορά μη συνεκτικά και χονδρόκοκα εδάφη η δυνατότητα αντιστάθμισης, δίνεται στο εκσκαπτόμενο υλικό μέσω μείωσης της διαπερατότητας του μέσω βελτιωτικών προσμίκτων. Γίνεται περισσότερο πλάστιμο μέσω της πρόσμιξης του με νερό και με υλικό τσιμεντολάσπης και κατ' επέκταση ευμετάφερτο και αδιπέρατο. Σε ένα πιο βασικό εύρος εφαρμογής που αφορά συνεκτικά εδάφη και σε περιπτώσεις εδαφών ικανοποιητικής διαβάθμισης κοκκομετρίας η υποβάθμιση της διαπερατότητας δεν είναι αναγκαία καθώς η μεταφορά πίεσης συμβαίνει μέσω τριχοειδών φαινομένων και το μόνο πιθανό πρόσμικτο σε αυτή την περίπτωση είναι το νερό.

Η παραπάνω μηχανοποιημένη διαδικασία συμβαίνει ώστε να μην αστοχήσει η επιφάνεια διάνοιξης και για έναν πιο σταθερό έλεγχο καθοδήγησης του μηχανήματος TBM. Πλέον, μέσω της διαδικασίας αυτής επιτυγχάνεται η ασφαλής και ταχεία διάνοιξη ακόμη και σε τύπους

χαλαρών κορεσμένων και ασταθών εδαφικών αποθέσεων όπου πριν ο συνδυασμός και των δύο παραγόντων ήταν πολύ δύσκολος να πραγματοποιηθεί.

- Μέσω ειδικών εμβόλων μετακινείται η ασπίδα προς τα εμπρός κατά το βήμα διάνοιξης και κατά αυτό τον τρόπο αποκαλύπτεται ο δακτύλιος ($n-7$) της σήραγγας που βρίσκεται στο τελευταίο πίσω μέρος αυτής και που μέχρι πριν καλυπτόταν. Αμέσως μετά, ξεκινά η εγκατάσταση του επόμενου δακτυλίου ($n-6$) που θα αποκαλυφθεί με την ίδια διαδικασία κατά το επόμενο βήμα διάνοιξης.
- Εγχέεται στο διανοιγόμενο κενό, ένεμα, στον αμέσως προηγούμενο δακτύλιο από τον αποκαλυπτόμενο ($n-8$) με μέτρο ελαστικότητας χαλαρού υλικού (αρχικό στάδιο σκλήρυνσης) και με την αρχική του εσωτερική πίεση βάσει προδιαγραφών. Το εγχυμένο ένεμα των ακόμην προηγούμενων βημάτων ακολουθεί τον σταδιακό νόμο σκλήρυνσης του ως υλικό, με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του και μείωση της εσωτερικής του πίεσης (Σχ. 4.11). Ο διαχωρισμός των δύο τελευταίων σταδίων του βήματος διάνοιξης είναι διακριτός για να τονιστεί η χρονικά εξαρτώμενη ιδιότητα του υλικού.

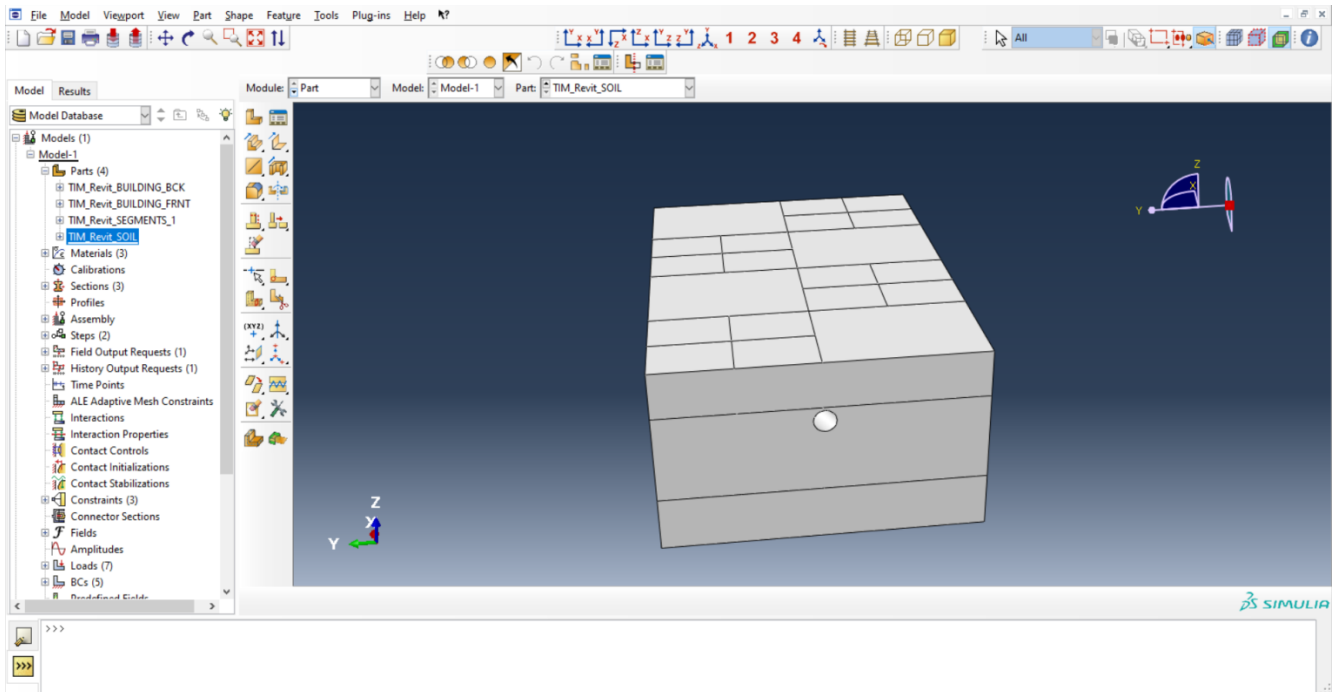


Σχ. 4.14: Απεικόνιση της προοδευτικής ανάπτυξης διάνοιξης της μεθόδου EPB διάνοιξης. **Πηγή:** Kanvadas M., Litsas D., Vazaios I., Fortsakis P., 2017, *Development of a 3D finite element model for shield EPB tunneling* - Science Direct

4.9 Αριθμητικό προσομοίωμα Μηχανοποιημένης σήραγγας (Περίπτωση ανάλυσης 1η)

Η διαδικασία προσομοίωσης στο αριθμητικό περιβάλλον Abaqus ξεκινάει με την εισαγωγή, ως συστατικά μέρη (parts) των γεωμετρικών και χωρικών οντοτήτων που αναπτύχθηκαν στο αντίστοιχο μοντέλο πληροφορίας από τον κώδικα του Dynamo script και αποθηκεύτηκαν σε

αρχεία *.sat* files. Οι γεωμετρίες που εισάγονται αφορούν τμήματα των μοντέλων του εδάφους με απουσία του εκσκαπόμενου όγκου, της σήραγγα ανά βήμα προόδου διάνοιξης και των υφιστάμενων κτιρίων της επιφάνειας (Σχ. 4.15).



Σχ. 4.15: Περιβάλλον Abaqus – Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος

Συνοπτικά, την εισαγωγή της γεωμετρίας ακολουθεί μία διαδικασία απόκτησης ταυτότητας, οντότητας και απόδοσης ιδιοτήτων. Ακολουθεί η δημιουργία εξάρτησης και η συσχέτιση μεταξύ των συστατικών μερών. Το προσομοίωμα αποκτά συνοριακές συνθήκες, φορτίζεται και πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του με πεπερασμένα στοιχεία. Τέλος πραγματοποιείται η κατάλληλη ανάλυση που θα αποδώσει τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, εν προκειμένω την καθίζηση συγκεκριμένων επιλεγμένων σημείων στην επιφάνεια του εδάφους και σε επιμέρους επιφάνειες που επίσης χρήζουν διερεύνησης. Συνεπώς τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

- Εισαγωγή γεωμετρίας ως συστατικά μέρη (import parts)
- Απόδοση ιδιοτήτων (material, section)
- Δημιουργία ενιαίου μοντέλου μέσω εξάρτησης των μερών (assembly)
- Απόδοση συνοριακών συνθηκών και συνθηκών καταπόνησης (BCs, Loads)
- Διακριτοποίηση των γεωμετριών και δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων (mesh)

- Ανάλυση του συνολικού προσομοιώματος εξάρτισης
- Εμφάνιση αποτελεσμάτων και αξιολόγηση (visualization)

Η συνολική διαδικασία προετοιμασίας του αριθμητικού προσομοιώματος χωρίζεται σε 3 (τρία) βασικά διακριτά στάδια που περιέχουν τα παραπάνω συνοπτικά βήματα. Η παραγωγή του αριθμητικού προσομοιώματος για την εν λόγω περίπτωση μελέτης αφορά την προοδευτική διαδικασία διάνοιξης του εδάφους η οποία πραγματοποιείται εντός 10 (δέκα) βημάτων διάνοιξης και άμεσης εγκατάστασης των αντίστοιχων τμημάτων της γεωμετρίας της σήραγγας. Τα συστατικά μέρη που εισάγονται ως γεωμετρίες στο αριθμητικό προσομοίωμα αφορούν για κάθε βήμα διάνοιξης την γεωμετρία του εδάφους με το αντίστοιχο πλήθος διανοιγόμενων επιφανειών, την γεωμετρία του πλήθους των τμημάτων της σήραγγας που εγκαθίσταται εντός της διανοιγόμενης δακτυλιοειδούς επιφάνειας στο αντίστοιχο βήμα και την γεωμετρία των υφιστάμενων κτιρίων της επιφάνειας και είναι σε πρώτη φάση ανεξάρτητα μεταξύ τους. Τα σχετικά επίπεδα λεπτομέρειας προσομοίωσης για την συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, για το έδαφος, τα κτίρια και την σήραγγα είναι μεσαίο, υψηλό και μεσαίο αντίστοιχα.

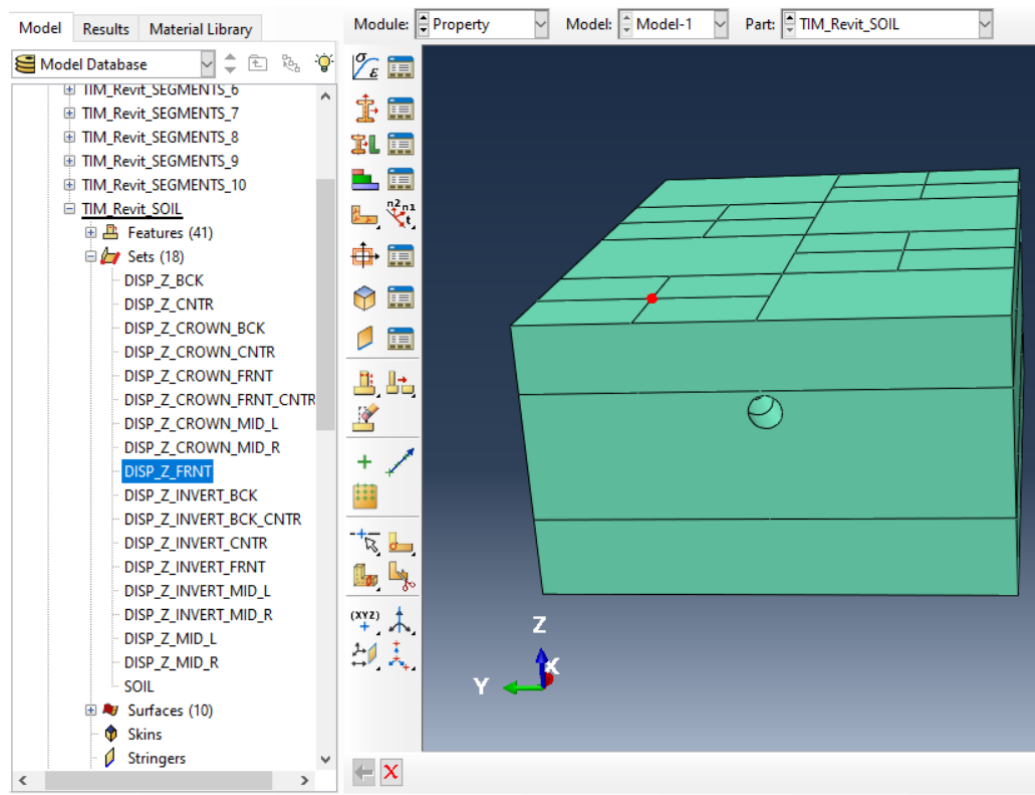
Η διαδικασία ξεκινάει ορίζοντας το υλικό που θα τα αντιπροσωπεύει τις γεωμετρίες, δίνοντας τους μηχανικές και ελαστικές ιδιότητες, στα πλαίσια έναρξης του πρώτου σταδίου προετοιμασίας. Σε ότι αφορά τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού, επιλέγεται το ελαστικό γραμμικό ισότροπο ομογενές υλικό για απόκριση με μικρές παραμορφώσεις. Δίνεται ως μέτρο ελαστικότητας η τιμή $E=40\text{Mpa}$ και ως λόγος Poisson $\nu=0.3$. Σε ότι αφορά το ειδικό βάρος του εδάφους δίνεται η τιμή 0 (μηδέν) (non-physical value) ώστε να μην συνυπολογιστεί το ίδιο βάρος του, ως συνθήκη φόρτισης, καθώς για το έδαφος θεωρείται ότι έχει επέλθει η συνθήκη ισορροπίας του, έπειτα από παλαιώση οποιονδήποτε παραγόντων διατάραξης του και μεταβολής της συνθήκης αυτής. Για το κάθε τμήμα της σήραγγας που εισάγεται επιλέγεται επίσης ελαστικό γραμμικό ισότροπο υλικό με ιδιότητες $E=22\text{GPa}$, $\nu=0.2$ και $\gamma=25\text{kN/m}^3$. Η γραμμική ελαστική απόκριση της σήραγγας αποτελεί λογική παραδοχή για τις μικρές παραμορφώσεις που συμβαίνουν. Σε ότι αφορά τις κατασκευές της επιφάνειας επιλέγεται ένα πολύ δύσκαμπτο γραμμικό ελαστικό υλικό με $E=2200\text{GPa}$, $\gamma=25\text{kN/m}^3$ και $\nu=0.2$ καθώς επιδιώκεται να μεταβιβάσουν αυτούσια τα φορτία, που φέρουν, στο έδαφος και εφόσον δεν διερευνάται η απόκρισή τους.

Για κάθε μια γεωμετρία ορίζονται οι αντίστοιχες κατηγορίες διατομής που πρόκειται να τις αντιπροσωπεύσουν και συσχετίζονται κατάλληλα με τα αντίστοιχα υλικά. Συγκεκριμένα για το έδαφος και τα υφιστάμενα κτίρια ορίζεται και αποδίδεται η διατομή ιδιότητας στερεού σώματος (solid section) ενώ για κάθε τμήμα της σήραγγας ορίζεται διατομή στοιχείου συνεχούς κελύφους (shell element section) με διάσταση πάχους 0.35m κατά τα σχέδια λεπτομερειών της πραγματικής περίπτωσης έργου του μετρό. Για τον αποτελεσματικότερο χειρισμό του προσομοιώματος ορίζονται για κάθε συστατικό μέρος γεωμετρίας συγκεκριμένες επιφάνειες (surfaces) και κατάλογοι σημείων/κόμβων ελέγχου (sets). Συγκεκριμένα, κατά το στάδιο αυτό, προετοιμασίας του αριθμητικού μοντέλου, το έδαφος υφίσταται εικονικό διαχωρισμό (partition)

ανάμεσα σε 3 υποτμήματα εδάφους μέσω επιφανειών τομής. Οι δύο επιφάνειες αυτές βρίσκονται σε βάθη 19.21m και 54.6m αντίστοιχα και εκτείνονται σε όλο το μήκος και πλάτος της γεωμετρίας του εδάφους. Οι επιφάνειες αυτές αποτελούν επιφάνειες εποπτείας των παραμορφώσεων του εδάφους για τα συγκεκριμένα βάθη, εντός των οποίων επιλέγονται συγκεκριμένοι κόμβοι εποπτείας και αποδιδόμενη πληροφορία καθιζήσεων. Τα βάθη αυτά επιλέχθηκαν ώστε οι επιφάνειες αυτές να αντιπροσωπεύουν τις άμεσα επηρεαζόμενες επιφάνειες κατά τη διάνοιξη, 1m άνω του πρώτου τμήματος της σήραγγας (tunnel crown) και 1m κάτω από το τελευταίο τμήμα (tunnel invert) καθώς η καμπύλη ευθυγραμμία της σήραγγας μεταβάλλεται με το βάθος με κλίσεις κατά το σχέδιο της μηκοτομής. Για κάθε μία επίπεδη επιφάνεια δημιουργούνται υποεπιφάνειες και εντός των κέντρων τους ορίζονται σημεία ελέγχου (sets) (Σχ. 4.16).

Πλέον η κάθε ανεξάρτητη γεωμετρία έχει αποκτήσει τις απαιτούμενες ιδιότητες και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της. Το δεύτερο στάδιο προετοιμασίας αφορά τον χειρισμό του συνολικού αριθμητικού μοντέλου και την αντιμετώπισή του ως ενιαίο σύνολο (assembly) μέσω απόκτησης εξαρτίσεων και απόδοσης αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μερών. Η αντιμετώπιση του ενιαίου προσομοιώματος γίνεται στα πλαίσια της διαδικασίας γενικευμένης στατικής ανάλυσης (static general step). Οι συνθήκες εξάρτισης και αλληλεπίδρασης εφαρμόζονται μέσω κατάλληλων συνδέσεων (constraints) μεταξύ των μερών και συγκεκριμένα μεταξύ των κατάλληλων επιφανειών τους που έχουν οριστεί στο πρώτο στάδιο προετοιμασίας.

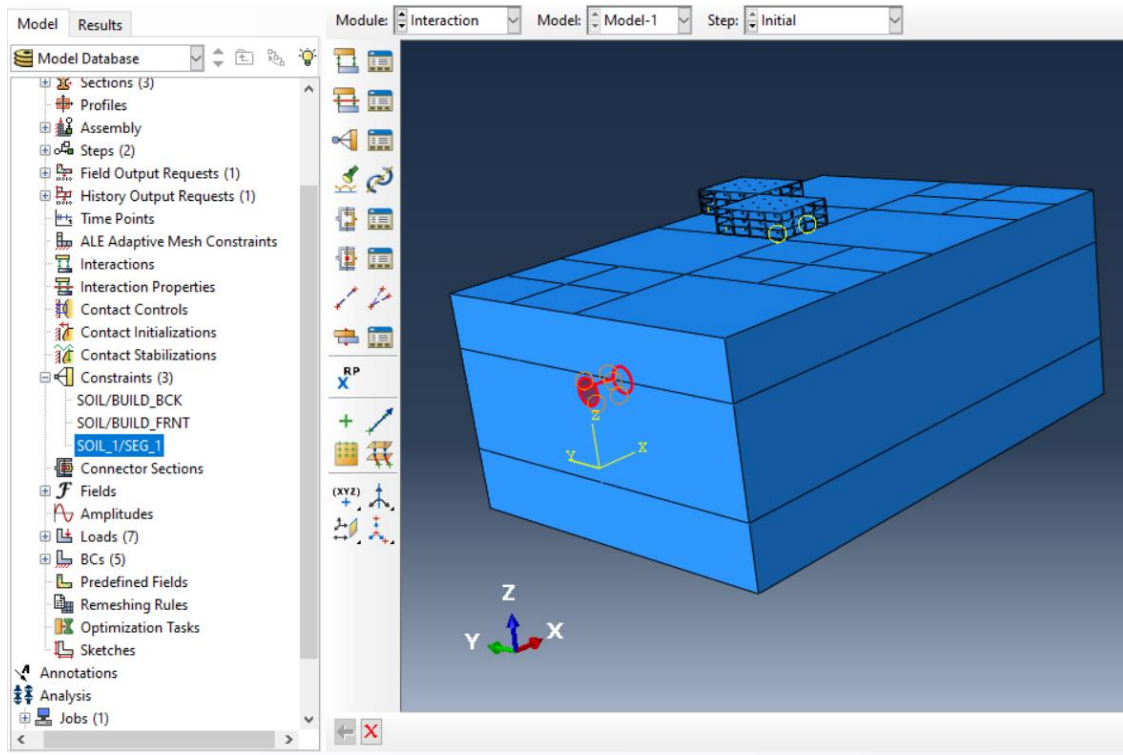
Η συνθήκη συνδέσμου (tie constraint) που δίνεται, αφορά την σχέση επαφής και κοινής απόκρισης των κοινών κόμβων των επιφανειών των μερών, χωρίς την δυνατότητα διείσδυσης της μίας συνδεδεμένης επιφάνειας εντός της άλλης, μέσω της μαθηματικής έκφρασης ισότητας των μετατοπίσεων των κόμβων. Κατά τη συνθήκη αυτή οι επιφάνειες καθορίζονται από τον χαρακτηρισμό σε κυρίαρχη επιφάνεια (master surface) και εγκλωβισμένη (slave surface) ανάλογα με το ποιός επιφάνειας η μετατόπιση τίθεται στο δεξί και στο αριστερό μέρος της έκφρασης, αντίστοιχα. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται μεταξύ των επιφανειών του εξωτερικού κελύφους των τμημάτων της σήραγγας και των εσωτερικών διανοιγόμενων επιφανειών του εδάφους. Για την συγκεκριμένη σύνδεση επιλέχθηκε να ανήκουν στο έδαφος οι κυρίαρχες επιφάνειες ενώ οι εγκλωβισμένες στα τμήματα της σήραγγας (Σχ. 4.17). Ακόμη συνδέονται μεταξύ τους τα τμήματα της σήραγγας στην μπροστινή και οπίσθια περιμετρική επιφάνειά τους με διαδοχική εναλλαγή κυρίαρχων και εγκλωβισμένων επιφανειών.



Σχ. 4.16: Τμηματοποιημένο αριθμητικό προσομοίωμα εδάφους - Ορισμός σημείου ελέγχου στην επιφάνεια

Εφόσον οι γεωμετρίες είναι σε θέση να λειτουργήσουν κατά συσχετισμένο τρόπο και ως ενιαίο μοντέλο απόκρισης, το προσομοίωμα τίθεται υπό συννοριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης. Τα επιβαλλόμενα φορτία είναι στατικά και αφορούν την καταπόνηση εκ του ιδίου βάρους των μερών του μοντέλου, πλην του εδάφους και μια κατανεμημένη ανηγμένη πίεση στην επιφάνεια του εδάφους, φορτίο το οποίο προέρχεται από την υφιστάμενη κατάσταση δόμησης.

Για να βρεθεί ο ακριβής αριθμός των κτιρίων που βρίσκονται στην επιφάνεια, πάνω από το όριο της περιοχής μελέτης ($189.2m \times 132m$), χρησιμοποιήθηκε η τεχνική georeferencing σε περιβάλλον GIS. Η τεχνική αυτή είναι απαραίτητη καθώς η οριζοντιογραφία έχει σχεδιαστεί σε ανεξάρτητο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Για την ακρίβεια των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το τοπογραφικό υπόβαθρο της απογραφής της ΕΛΣΤΑΤ (2011), το οποίο έχει γεωγραφική αναφορά το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ'87. Ακολουθώντας η οριζοντιογραφία της σήραγγας, προσαρμόστηκε στο τοπογραφικό υπόβαθρο της ΕΛΣΤΑΤ, χρησιμοποιώντας 5 (πέντε) κοινά σημεία με αρκετά ικανοποιητική χωρική ακρίβεια ($RMS < 1m$) (Σχ. 6.1).



Σχ. 4.17: Συνθήκη συνδέσμων (tie constraint) μεταξύ εσωτερικής επιφάνειας διανοιγόμενου εδάφους (master surface) και εξωτερικού κελύφους τμήματος της σήραγγας (slave surface)

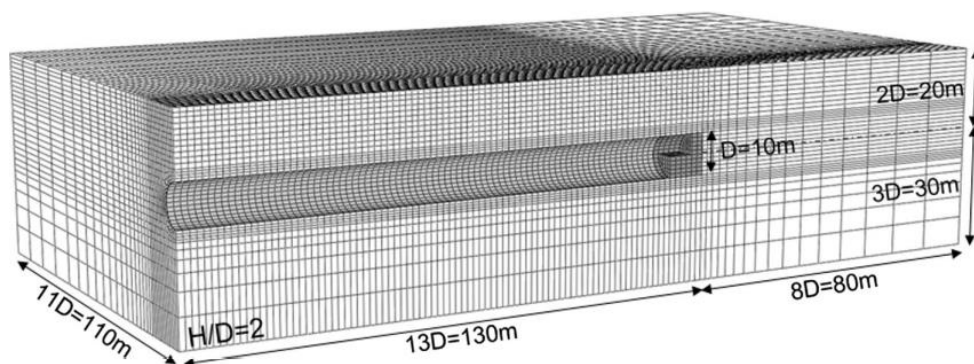
Η περιοχή μελέτης σχεδιάστηκε ως πολύγωνο. Τα GIS επιτρέπουν την υποβολή χωρικών ερωτημάτων (spatial queries) όπως αυτό του εντοπισμού του αριθμού των κτιρίων (πολύγωνα) που έχουν το κέντρο βάρους τους εντός της περιοχής μελέτης (Σχ. 6.2). Εντοπίστηκαν 39 (τριάντα εννέα) κτίρια που πληρούν το κριτήριο αυτό με συνολική επιφάνεια κάλυψης $3.603m^2$. Ο μέσος όρος των ορόφων των κτιρίων της περιοχής είναι 3 (τρεις). Συνεπώς, η συνολική δομημένη επιφάνεια είναι $10.809m^2$. Με κριτήριο ένα τυπικό κτίριο και τα φορτία που του αναλογούν κατά τον σχεδιασμό προκύπτει φορτίο $70kN/m^2$. Ωστόσο με βάση το συντελεστή δόμησης της περιοχής ο μέγιστος αριθμός ορόφων που μπορεί να δομηθεί είναι 4 (τέσσερις). Αν λάβουμε υπόψη μας αυτή τη συνθήκη, το φορτίο προκύπτει $95kN/m^2$. Λόγω του γεγονότος των δύο διαφορετικών τιμών του μεγέθους του φορτίου που προκύπτουν επιλέγεται η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια εναλλάξ και διαγωνίως (σκακιέρα) σε κάρναβο $2x4$ επιφανειών (Σχ. 4.19).

Σε ότι αφορά τις συνοριακές συνθήκες, αποδόθηκαν δεσμεύσεις σε κάθε πλευρά του μοντέλου του εδάφους πλην της επιφάνειας. Συγκεκριμένα, στην κάτω πλευρά αποδόθηκε μεταφορική δέσμευση στους κόμβους της επιφάνειας κατά τους 3 (τρεις) άξονες (x, y, z), στις 2 (δύο) πλαϊνές πλευρές κατά τους άξονες x και y και τέλος στην μπροστινή και την οπίσθια πλευρά κατά τον άξονα x . Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή των διαστάσεων

κατά την παραμετρική ανάπτυξη του μοντέλου πληροφορίας του εδάφους έγινε με κριτήριο την ικανοποίηση τριών συνθηκών:

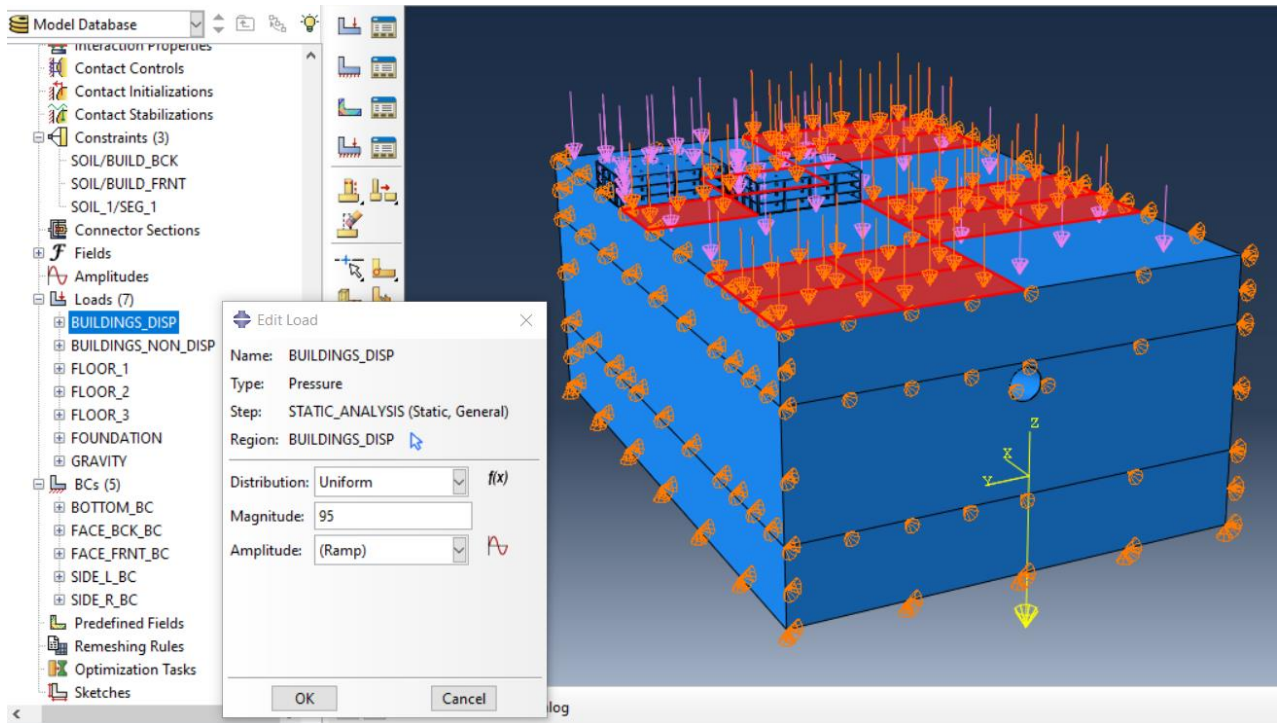
- Αποτροπή επίδρασης των συνοριακών συνθηκών στα αποτελέσματα απόδοσης του αριθμητικού μοντέλου
- Αποφυγή λανθασμένων αποτελεσμάτων
- Μείωση του υπολογιστικού φορτίου και χρόνου ανάλυσης

Προς ικανοποίηση των παραπάνω συνθηκών επιλέχθηκαν οι διαστάσεις του μήκους, του πλάτους και του ύψους του μοντέλου εδάφους συναρτήσει του βάθους διάνοιξης (H) και της εξωτερικής ακτίνας της σήραγγας (D). Συγκεκριμένα, η διάσταση του ύψους προέκυψε από την σχέση $(H+4D)$ και οι διαστάσεις του μήκους και του πλάτους από την σχέση $2(H+4D)$ (Castellanza *et al.*, 2008). Επιπλέον η διάσταση του ύψους του εδάφους, λόγω της κατά μήκος κλίσης που παρουσιάζει η καμπύλη ευθυγραμμία της σήραγγας, αυξήθηκε και προσαρμόστηκε ώστε η απόσταση του κέντρου βάρους του τελευταίου και βαθύτερου τμήματος της σήραγγας από το τελικό επίπεδο βάθους του εδάφους, να μην είναι μικρότερη από $3D$ (Kavvads *et al.*, 2017) (Σχ. 4.18). Έτσι η τελική διαμόρφωση των διαστάσεων είναι: ύψος = $78m$ και πλάτος = $132m$ για $H = 29.69m$ και $D = 9.18m$. Η διάσταση του μήκους καθορίστηκε και ταυτίστηκε με το επιλεγμένο υπό εξέταση τμήμα της σήραγγας ενώ εκείνη του ύψους είναι αυξημένη καθώς η καμπύλη ευθυγραμμία της σήραγγας μεταβάλλεται με το βάθος κατά τη μηκοτομή.



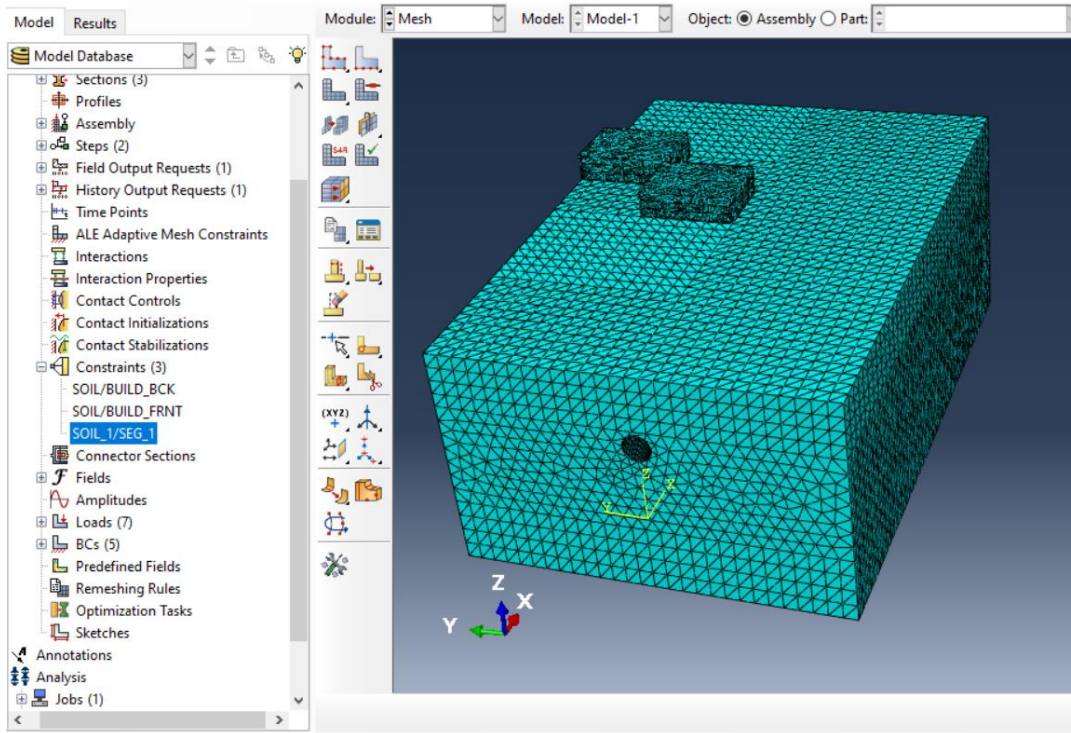
Σχ. 4.18: Γενική διαμόρφωση συνόρων του αριθμητικού προσομοιώματος εδάφους – Συμμετρική απεικόνιση

Αρκετές προσομοιώσεις θεωρούν και αναλύουν το μισό προσομοίωμα για λόγους αξονικής συμμετρίας, που επιτρέπουν υπολογιστική ανακούφιση. Ωστόσο στην συγκεκριμένη περίπτωση προσομοίωσης λόγω της μη συμμετρικής καμπύλης γεωμετρίας της ευθυγραμμίας της σήραγγας και της μη συμμετρικής κατανομής της υφιστάμενης επιφανειακής δόμησης, αναλύθηκε ολόκληρο το μοντέλο.



Σχ. 4.19: Επιφανειακή καταπόνηση εκ της υφιστάμενης δόμησης και διαμόρφωση συνοριακών συνθηκών του αριθμητικού μοντέλου

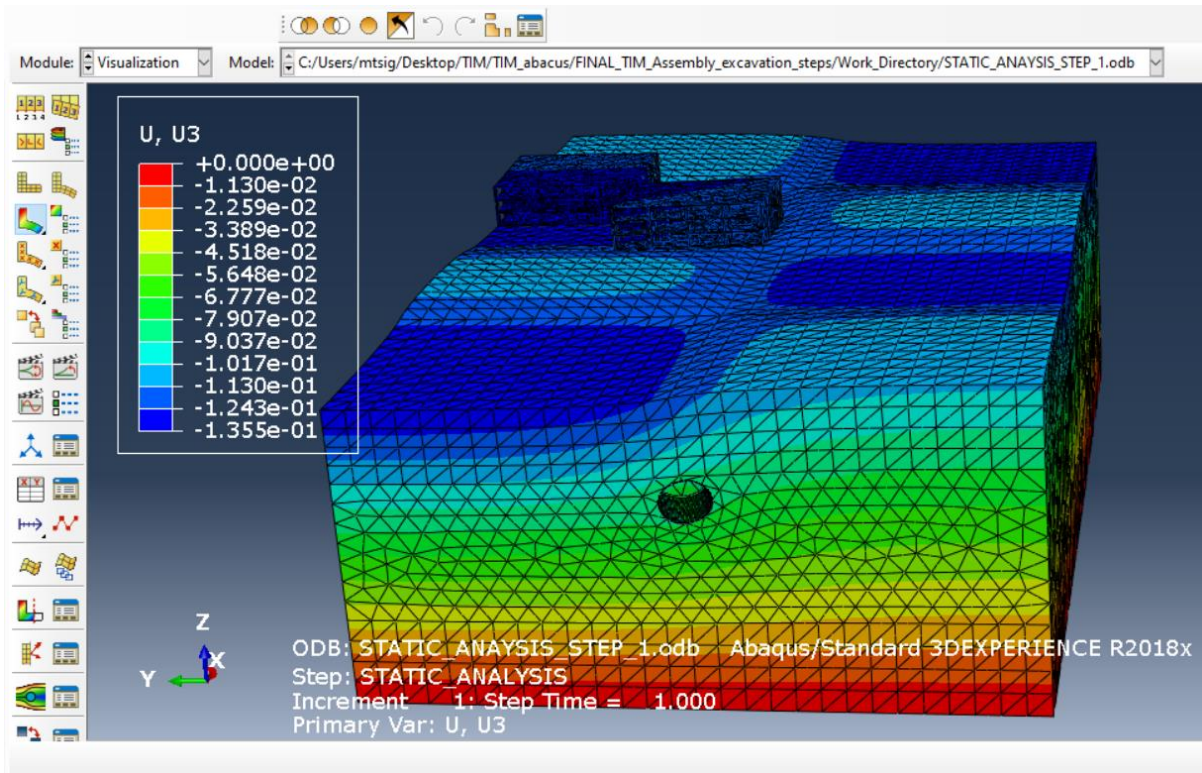
Το τρίτο στάδιο αφορά την προετοιμασία του εδάφους ώστε να υποβληθεί σε αριθμητική ανάλυση με τη μέθοδο απομειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration). Η μέθοδος αυτή αφορά την απομείωση του πλήθους των επιλύσεων της μαθηματικής έκφρασης της δυσκαμψίας των στοιχείων η οποία σχετίζεται με το πλήθος των κόμβων τους. Προς τον σκοπό αυτό, το προσομοίωμα διακριτοποιείται και η δομή του πλέον αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία που περιέχουν την πληροφορία και τα χαρακτηριστικά που έχουν δοθεί στις γεωμετρίες στο πρώτο στάδιο. Για έναν περισσότερο λειτουργικό και ακριβή χειρισμό, η διαδικασία διακριτοποίησης επιτυγχάνεται ξεχωριστά για κάθε γεωμετρία του ενιαίου μοντέλου. Η κάθε γεωμετρία διακριτοποιείται με συγκεκριμένο βήμα και μορφή πεπερασμένου στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα, για το έδαφος σχηματίζεται δίκτυο 5-κομβικών πεπερασμένων στοιχείων στερεού (tetrahedra) ανά 5m εδάφους. Τα κτίρια της επιφάνειας ως γεωμετρίες με ιδιότητα στερεού διακριτοποιούνται με τα ίδια στοιχεία όπως και το έδαφος, ανά 3m. Τέλος κάθε τμήμα της σήραγγας αφορά δίκτυο 3-κομβικών (triangle) πεπερασμένων στοιχείων κελύφους ανά 1m (Σχ. 4.20).



Σχ. 4.20: Διαμορφωμένο δίκτυο διακριτοποίησης ως απεικόνιση στο ενιαίο σύνολο των γεωμετριών

Ένα πιο ακριβές δίκτυο θα απαιτούσε σχεδόν κοινό βήμα διακριτοποίησης για τις γεωμετρίες, καθώς πρόκειται να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους και να διαδώσουν την πληροφορία ως ενιαίο αριθμητικό μοντέλο. Ωστόσο το εύρος κλίμακας που απασχολεί το έργο της μηχανοποιημένης σήραγγας είναι αρκετά διευρυμένο κάτι που σε συνδυασμό με μία πολύ πυκνή και ομοιόμορφη διακριτοποίηση καθίσταται υπολογιστικά δυσχερές και δυσανάλογο των απαιτήσεων του επιδιωκόμενου στόχου. Μία μέση προσέγγιση αφορά την παραγωγή ενός ανομοιόμορφου δικτύου διαστρωματικής διακριτοποίησης προς αποφυγή μέρους του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου και την πύκνωση του, με απόδοση περισσότερης λεπτομέρειας σε σημεία ή επιφάνειες ενδιαφέροντος. Η ανομοιομορφία αφορά την βαθμιαία αριθμητικά ελεγχόμενη και αυξανόμενη εξάπλωση του δικτύου από την περιοχή της πυκνής προς την πιο αραιή διαμόρφωση. Ωστόσο για πολύπλοκες γεωμετρίες και συσχετίσεις η διαμόρφωση και ο έλεγχος ενός ανομοιόμορφου δικτύου διακριτοποίησης απαιτεί προσεκτικό χειρισμό με περισσότερη λεπτομέρεια προς διατήρηση μιας ομοιόμορφης πύκνωσης και αραιώσης του δικτύου.

Το τελικό στάδιο αφορά την επιλογή, τον ορισμό και την εκτέλεση της μεθόδου ανάλυσης του αριθμητικού προσομοιώματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η γραμμική ελαστική στατική ανάλυση του αριθμητικού, κατάλληλα προετοιμασμένου μοντέλου. Ακολουθεί η απόδοση και η εμφάνιση των επιδιωκόμενων αποτελεσμάτων των καθιζήσεων των επιφανειών και των κόμβων εποπτείας (Σχ. 4.21).



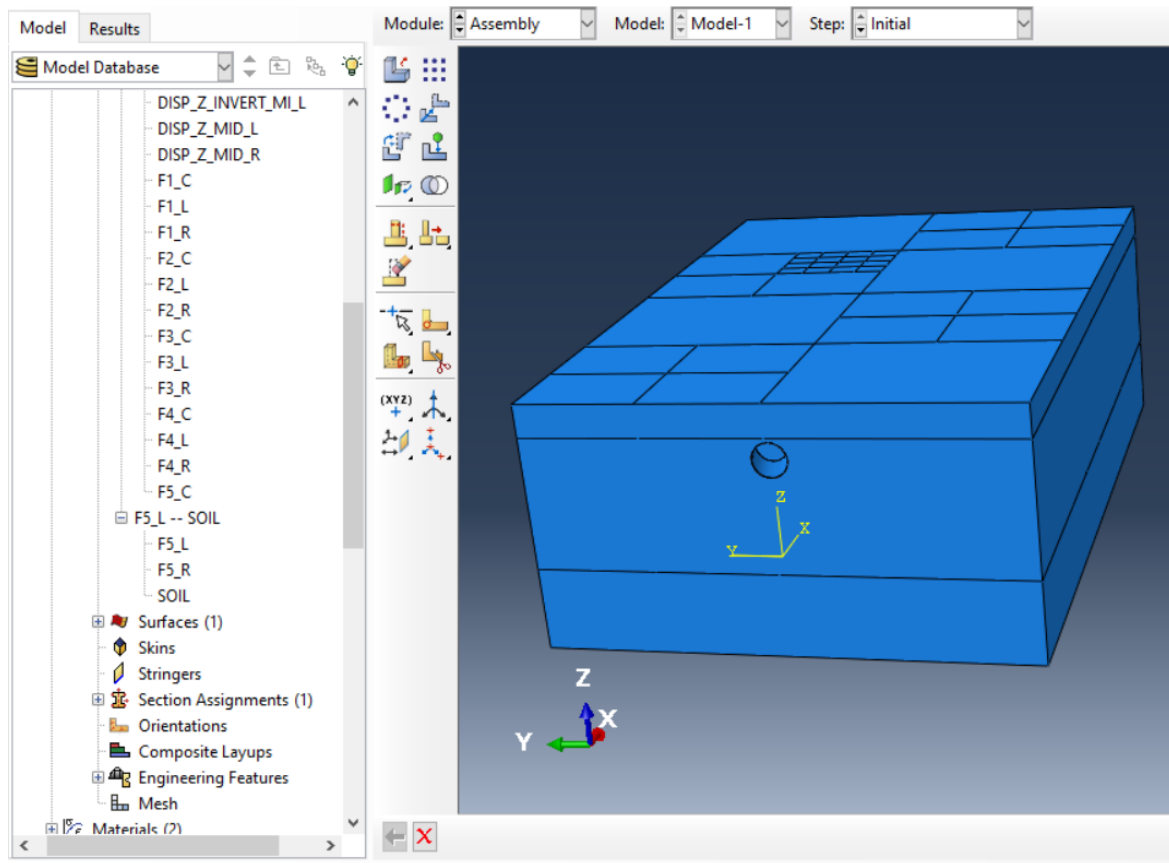
Σχ. 4.21: Παραμορφωμένη απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος – Περίπτωση ανάλυσης 1^η

4.10 Αριθμητικό προσομοίωμα Ρηχής σήραγγας (Περίπτωση ανάλυσης 2^η)

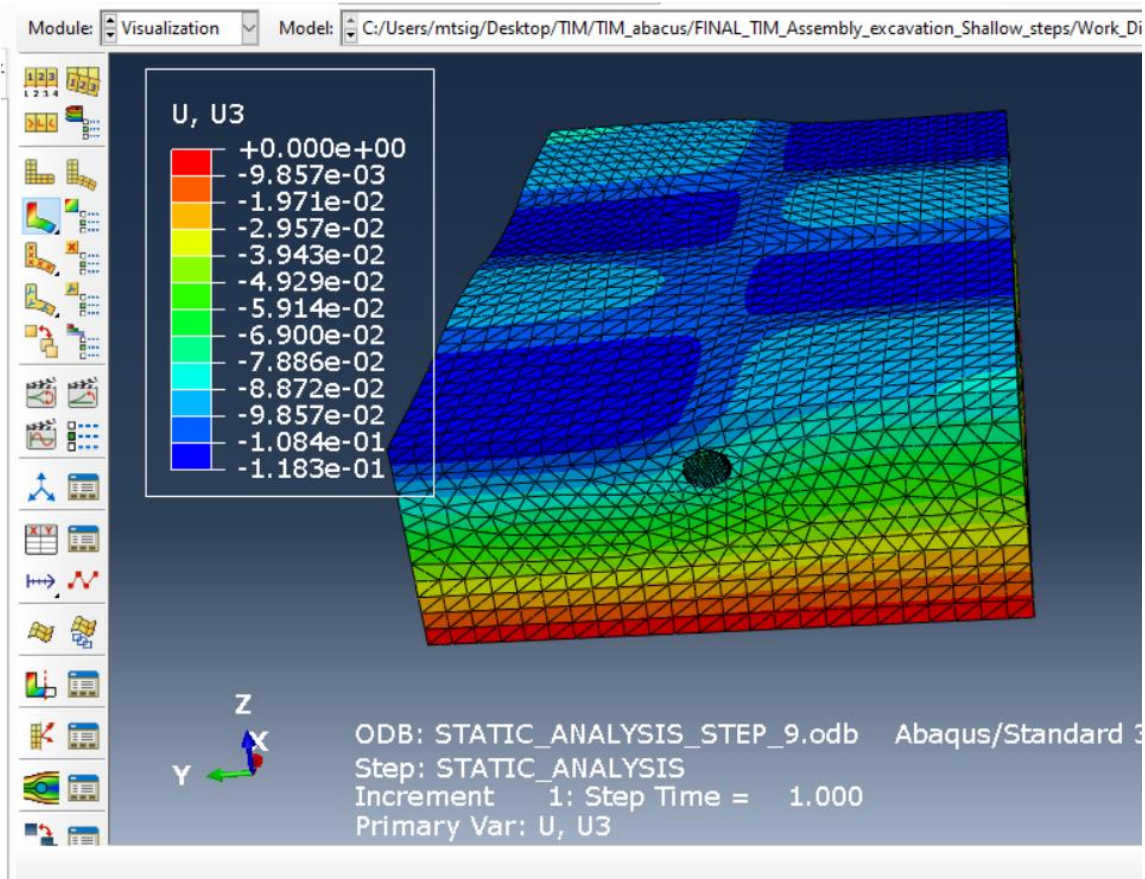
Η συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης αναπτύχθηκε για την σύγκριση των αποτελεσμάτων της με την πραγματική κατάσταση υλοποίησης του έργου συνοδευόμενη επίσης από τις αντίστοιχες παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης. Κατά την διαδικασία ανάπτυξης του προσομοιώματος της ρηχής σήραγγας, εκτός από την απόδοση των ζητούμενων καθιζήσεων των επιφανειών και των κόμβων ελέγχου, αναδείχθηκε η σημασία και η συνεισφορά της έννοιας και των δυνατοτήτων των αυτοματοποιημένων ενεργειών που διέπουν την συνολική διαδικασία αντιμετώπισης του έργου της μηχανοποιημένης σήραγγας καθώς και της παραμετρικής μοντελοποίησης της πληροφορίας του εν λόγω πολύπλοκου ως προς την αντιμετώπιση και πολυεπίπεδου ως προς την προσέγγιση, έργου.

Πιο συγκεκριμένα, τα δύο περιβάλλοντα ανάπτυξης και ανάλυσης των γεωμετριών του έργου μέσω της ισχυρής επικοινωνίας, διασύνδεσης και απόκρισής τους επαλήθευσαν την έννοια και την σύλληψη της ιδέας της οργάνωσης και της διαχείρισης ενός ολιστικού μοντέλου, μίας υπερκατασκευής μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Με μία απλή αλλαγή της παραμέτρου του βάθους διάνοιξης και πάχους υπερκάλυψης του εδάφους, το μοντέλο πληροφορίας προσαρμόστηκε με ταχύτητα και ακρίβεια στην νέα απόδοση γεωμετρίας. Ακολούθως, μέσω της

επεξεργασίας αρχείων (.jnl) υλοποιημένων ενεργειών υπό μορφή κώδικα, το αριθμητικό προσομοίωμα ανταποκρίθηκε εξίσου αξιόπιστα και έγκυρα εκτελώντας αυτοματοποιημένα όλες τις προσαρμοσμένες, στην νέα γεωμετρία, ενέργειες της αριθμητικής προσομοίωσης, αποδίδοντας τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα (Σχ. 4.22). Εκτελέστηκε και σε αυτή την περίπτωση γραμμική ελαστική στατική ανάλυση (Σχ. 4.23). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης επιλέχθηκε και δημιουργήθηκε επιπλέον ένας κάρναβος 5x5 σημείων εποπτείας στην επιφάνεια του εδάφους προς διερεύνηση των διαφορικών καθιζήσεων των κτιρίων της επιφάνειας. Και σε αυτήν την περίπτωση επιλέγεται η γραμμική ελαστική στατική ανάλυση του αριθμητικού μοντέλου.



Σχ. 4.22: Αριθμητικό προσομοίωμα Ρηχής σήραγγας



Σχ. 4.23: Παραμορφωμένη απεικόνιση του αριθμητικού προσομοιώματος – Περίπτωση ανάλυσης 2^η

4.11 Αριθμητικό προσομοίωμα Διαδικασίας Διάνοιξης (Περίπτωση ανάλυσης 3^η)

Το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της διαδικασίας διάνοιξης προσπάθησε να αποδώσει μια πιο ρεαλιστική εκδοχή της απόκρισης των γεωμετριών που αλληλεπιδρούν και των επιδράσεων αυτών σε ότι αφορά τις παραμορφώσεις του εδάφους. Προς τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε το αντίστοιχο μοντέλο πληροφορίας που περιέχει επιπλέον τις γεωμετρίες του δομικού μηχανήματος TBM και του εγχεόμενου ενέματος εντός του δημιουργούμενου διανοιγόμενου κενού. Τα επίπεδα λεπτομέρειας των γεωμετριών που εισάγονται όπως έχει προαναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι το μεσαίο και θεωρητικά το υψηλό για το μηχάνημα TBM και το ένεμα, αντίστοιχα.

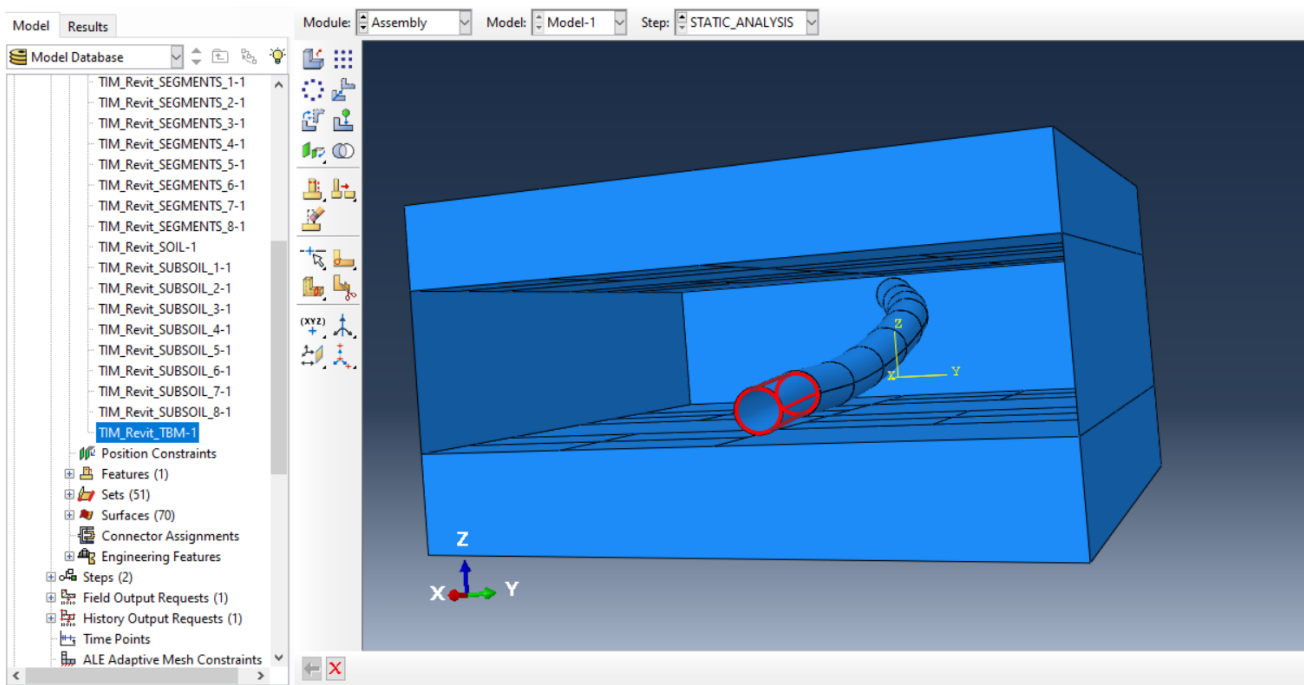
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις για την προετοιμασία του αριθμητικού προσομοιώματος η οποία αφορά 10 (δέκα) βήματα διάνοιξης και εγκατάστασης για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Το μοντέλο του εδάφους διανοίγεται πλήρως και δεν προσομοιώνεται επιπλέον κάλυψη του εδάφους μετά το πέρας της διάνοιξης καθώς η ανάλυση δεν προσανατολίζεται στη διερεύνηση των πιέσεων που αναπτύσσονται στο μέτωπο διάνοιξης.

Συγκεκριμένα για το μηχάνημα TBM το υλικό που επιλέγεται να το αντιπροσωπεύει είναι γραμμικό ελαστικό με $E=220GPa$, $\nu=0.28$ και $\gamma=78.5kN/m^3$. Αντίστοιχα επιλέγεται γραμμικό ελαστικό υλικό και για την γεωμετρία του ενέματος. Σε ό,τι αφορά την αριθμητική προσομοίωση του ενέματος έγινε προσπάθεια απόδοσης της χρονικής εξάρτησης της ιδιότητας σκλήρυνσης του. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης η διαδικασία προόδου της διάνοιξης αφορά και εισάγει επιπλέον παράγοντες και συνθήκες.

Κατά το πρώτο βήμα της προσομοίωσης της διάνοιξης περιέχεται εντός του πρώτου διανοιγόμενου κενού το μηχάνημα TBM και το τμήμα του μοντέλου του χαλαρού διαταραγμένου εδάφους που το περιβάλλει. Στο δεύτερο βήμα προόδου το μηχάνημα έχει διανοίξει το αμέσως επόμενο τμήμα του εδάφους και περιέχεται σε αυτό, μαζί με το αντίστοιχο επόμενο τμήμα του χαλαρού εδάφους. Η αρχική επιφάνεια διάνοιξης περιέχει πλέον το εγκατεστημένο τμήμα της σήραγγας, το τμήμα του μοντέλου του ενέματος που το περιβάλλει καθώς και το αποκατεστημένο τμήμα του εδάφους που περιβάλλει το ένεμα για τεχνικούς λόγους διευκόλυνσης της προσομοίωσης. Σε αυτό το βήμα οι ιδιότητες του ενέματος είναι διαφορετικές σε σχέση με την τελική μορφή του. Συγκεκριμένα οι ιδιότητες του ως υλικό είναι $E=0.2GPa$, $\nu=0.2$ και $\gamma=20kN/m^3$ κατά το χρονικό διάγραμμα σκλήρυνσης του (Σχ. 4.11).

Το τρίτο βήμα προόδου διάνοιξης βρίσκει το μηχάνημα TBM και το τμήμα του χαλαρού εδάφους εντός της τρίτης διαδοχικά διανοιγόμενης επιφάνειας. Η αμέσως προηγούμενη περιέχει πλέον το νέο εγκατεστημένο τμήμα σήραγγας, το περιβάλλον μη σκληρυμένο ένεμα και το αποκατεστημένο έδαφος. Η αρχική διανοιγόμενη επιφάνεια περιέχει το αρχικό εγκατεστημένο τμήμα της σήραγγας και το πλέον σκληρυμένο ένεμα, στην τελική του μορφή, με ιδιότητες $E=1GPa$, $\nu=0.2$ και $\gamma=20kN/m^3$. Ακόμη συνεχίζει να περιέχεται το αποκατεστημένο έδαφος. Το υλικό της γεωμετρίας του αποκατεστημένου εδάφους έχει ακριβώς τις ίδιες ιδιότητες με το έδαφος, ενώ η γεωμετρία του χαλαρού εδάφους διαφέρει κατά 1 (μία) μειωμένη τάξη του μέτρου ελαστικότητας με $E=4MPa$. Η συγκεκριμένη γεωμετρία προσπαθεί να αποδώσει τις ραγδαίες παραμορφώσεις που υφίσταται το έδαφος τοπικά.

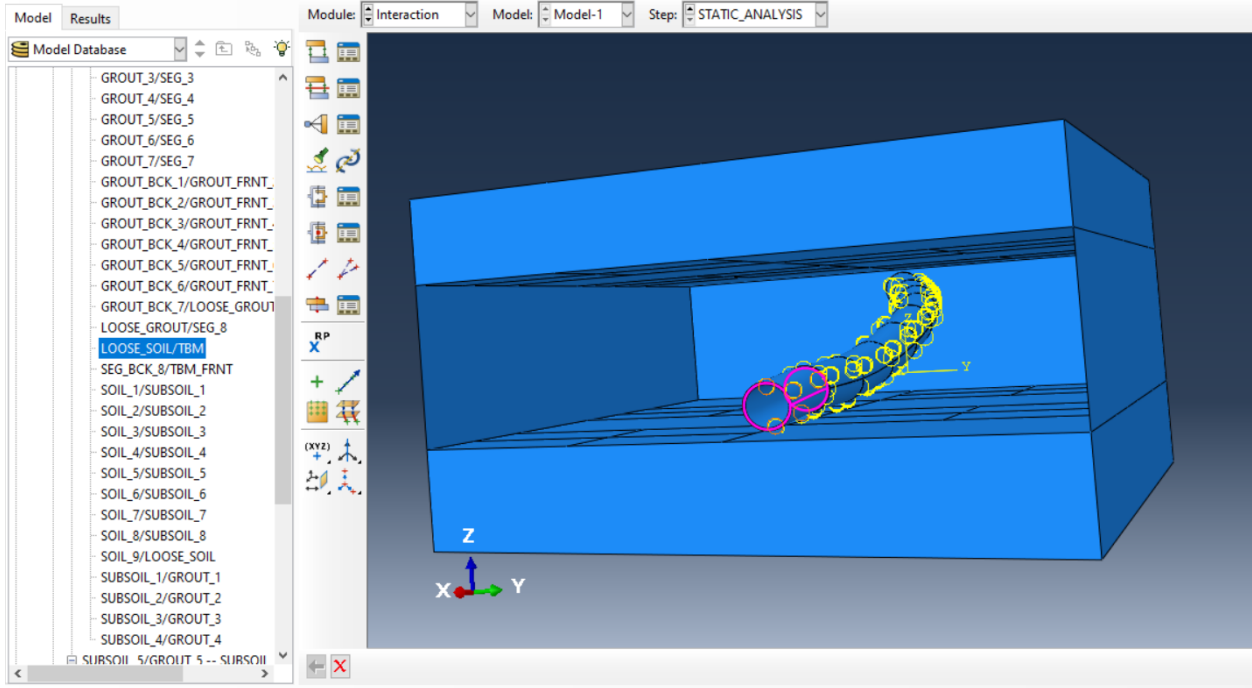
Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για 10 (δέκα) βήματα διάνοιξης και τελικής διαμόρφωσης της εγκατεστημένης σήραγγας εντός του εδάφους. Σε κάθε νέο βήμα διάνοιξης περιέχεται το μηχάνημα TBM και το αντίστοιχο τμήμα χαλαρού διαταραγμένου εδάφους. Στο αμέσως προηγούμενο περιέχεται το κάθε νέο εγκατεστημένο τμήμα της σήραγγας, το τμήμα μη σκληρυμένου ενέματος και το νέο τμήμα αποκατεστημένου εδάφους. Σε όλες τις προηγούμενες διανοιγόμενες επιφάνειες περιέχονται τα αντίστοιχα εγκατεστημένα τμήματα της σήραγγας, του σκληρυμένου ενέματος και του αποκατεστημένου εδάφους (Σχ. 4.24).



Σχ. 4.24: Αριθμητικό προσομοίωμα διαδικασίας διάνοιξης κατά το ένατο βήμα ανάπτυξης

Εφόσον έχουν δημιουργηθεί τα υλικά που θα αντιπροσωπεύσουν τις παραπάνω επιπλέον γεωμετρίες που έχουν εισαχθεί στο προσομοίωμα, ορίζονται οι διατομές τους. Τόσο για το μηχάνημα TBM και το ένεμα, όσο και για τους δύο τύπους εδαφών που εισάγονται, ορίζονται διατομές ιδιότητας στερεού στοιχείου, συσχετίζονται με τα υλικά και αποδίδονται στις γεωμετρίες. Το μηχάνημα TBM αποτελεί ένα στερεό στοιχείο, με το χαρακτηριστικό της κωνικότητας, πάχους 25cm. Αντίστοιχα το χαλαρό διαταραγμένο έδαφος, με μεταβαλλόμενο πάχος από 25cm έως 47.5cm παρακολουθεί την κωνικότητα της ασπίδας. Το ένεμα και το αποκατεστημένο έδαφος αποτελούν επίσης στερεά στοιχεία, πάχους 25cm. Για κάθε γεωμετρία επιλέγονται συγκεκριμένες επιφάνειες, οι οποίες θα συμμετέχουν στα επόμενα στάδια προετοιμασίας, κυρίως στο στάδιο σύνδεσης που απαιτεί η ενιαία διαμόρφωση εξάρτισης των γεωμετριών. Συγκεκριμένα επιλέγεται το εσωτερικό και εξωτερικό κέλυφος των στερεών γεωμετριών. Ειδικά για το ένεμα και το μηχάνημα TBM επιλέγονται επιπλέον οι μπροστινές και οπίσθιες επιφάνειές τους. Ακολουθεί η διαμόρφωση της ενιαίας γεωμετρίας (Σχ. 4.25). Για την επίτευξη της ενιαία απόκρισης του μοντέλου συνδέονται οι εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες των γεωμετριών κατά σειρά:

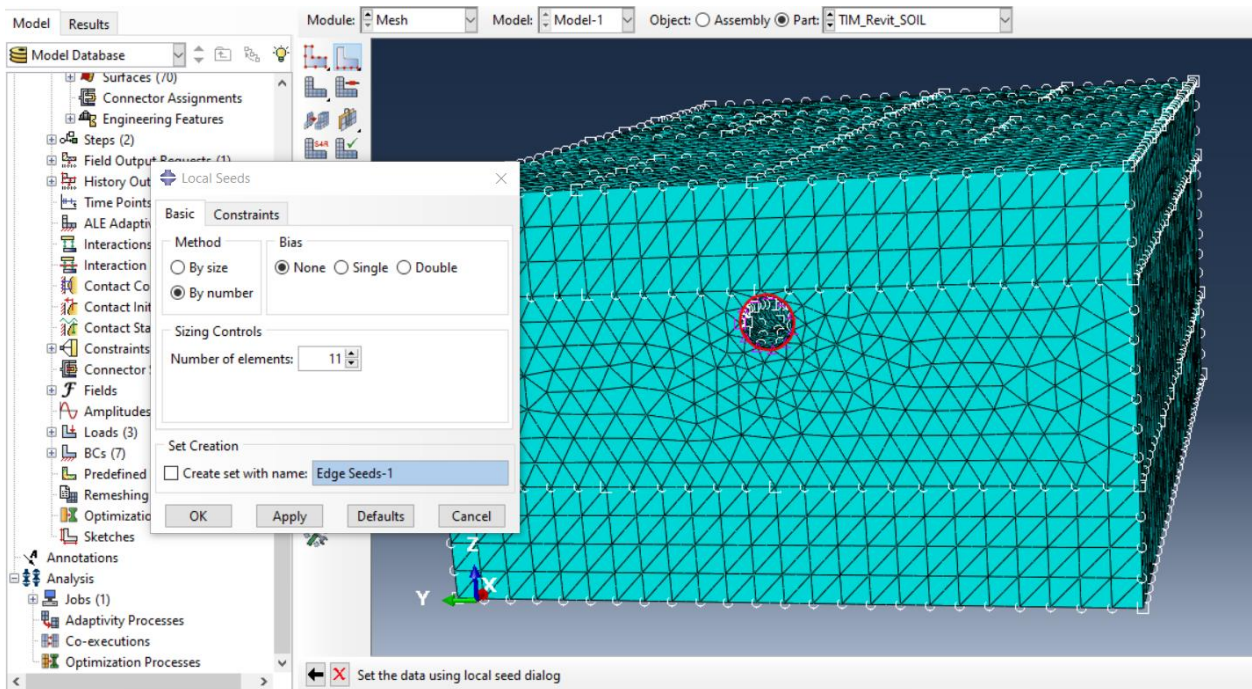
- 1) Έδαφος/αποκατεστημένο έδαφος και έδαφος/χαλαρό έδαφος (tie constraint)
- 2) Αποκατεστημένο έδαφος/ένεμα ή μη σκληρυμένο ένεμα (tie constraint)
- 3) Χαλαρό έδαφος/TBM και ένεμα ή μη σκληρυμένο ένεμα/σήραγα (tie constraint)
- 4) Ένεμα/ένεμα (tie constraint)
- 5) TBM/σήραγα (shell to solid constraint)



Σχ. 4.25: Συνθήκη συνδέσμων (tie constraint) μεταξύ εσωτερικής επιφάνειας διαταραγμένου εδάφους (master surface) και εξωτερικής επιφάνειας του μηχανήματος TBM (slave surface)

Η συνέχεια αφορά την απόδοση των συνοριακών συνθηκών και της επιφανειακής καταπόνησης στο αριθμητικό μοντέλο. Αποτελεί την ίδια διαδικασία με τις προηγούμενες περιπτώσεις με τη μόνη διαφορά ότι στις όψεις του πρώτου και του δέκατου τμήματος διάνοιξης δεσμεύεται η μετακίνηση του αποκατεστημένου και του χαλαρού εδάφους κατά τον άξονα x.

Το στάδιο της διακριτοποίησης διαμορφώνει για όλες τις επιπλέον γεωμετρίες (TBM, ένεμα, αποκατεστημένο έδαφος, χαλαρό έδαφος) ένα δίκτυο 5-κομβικών στερεών στοιχείων (tet) ανά 1m βήματος εξέλιξης της διαμόρφωσης. Ειδικά για το στάδιο της διακριτοποίησης, σε ορισμένες γεωμετρίες, απαιτήθηκε η πύκνωση του δικτύου καθώς στην συγκεκριμένη περίπτωση μεταφέρουν τις πληροφορίες της ανάλυσης περισσότερες γεωμετρίες που αλληλεπιδρούν με περισσότερες συνδέσεις. Σε ορισμένα βήματα, μάλιστα, απαιτήθηκε η πύκνωση σχεδόν όλων των γεωμετριών ώστε να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους. Στις περιπτώσεις που το μοντέλο του εδάφους χρειάστηκε πύκνωση του δικτύου του, επιλέχθηκε η βαθμιαία διαμόρφωση διακριτοποίησης με πιο πυκνή διάταξη, ακτινικά, περιμετρικά της διανοιγόμενης επιφάνειας καθ' όλο το μήκος της σήραγγας και με βαθμιαία αραίωση προς τα σύνορα του μοντέλου, λόγω του αυξημένου πλήθους στοιχείων που προέκυπταν και άρα του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου και χρόνου.



Σχ. 4.26: Διαμορφωμένο δίκτυο διακριτοποίησης ως απεικόνιση με ακτινική πύκνωση τοπικά

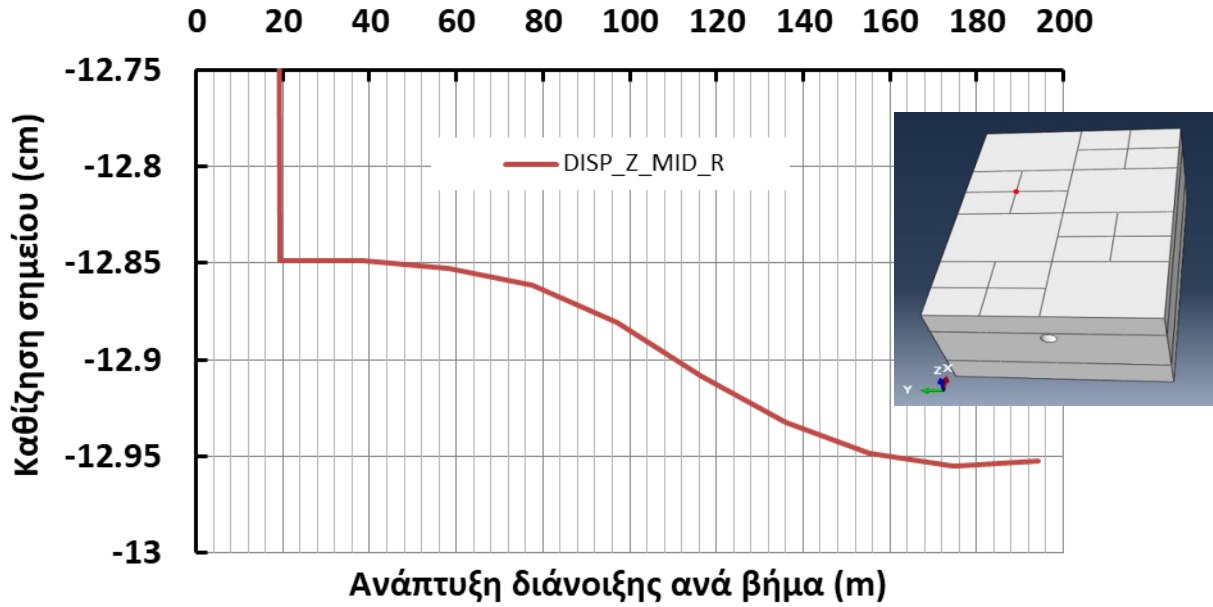
Η μέθοδος ανάλυσης και σε αυτή την περίπτωση είναι η γραμμική ελαστική στατική ανάλυση. Κατά το στάδιο απεικόνισης της παραμορφωμένης κατάστασης του προσομοιώματος προέκυψε η διείσδυση της γεωμετρίας του χαλαρού εδάφους εντός της αντίστοιχης του μηχανήματος TBM. Αυτό σημαίνει πως η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση απαιτεί μη γραμμικές συνθήκες σύνδεσης, κατάσταση που είναι εκτός του πεδίου διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Ερμηνεία και σύγκριση αποτελεσμάτων

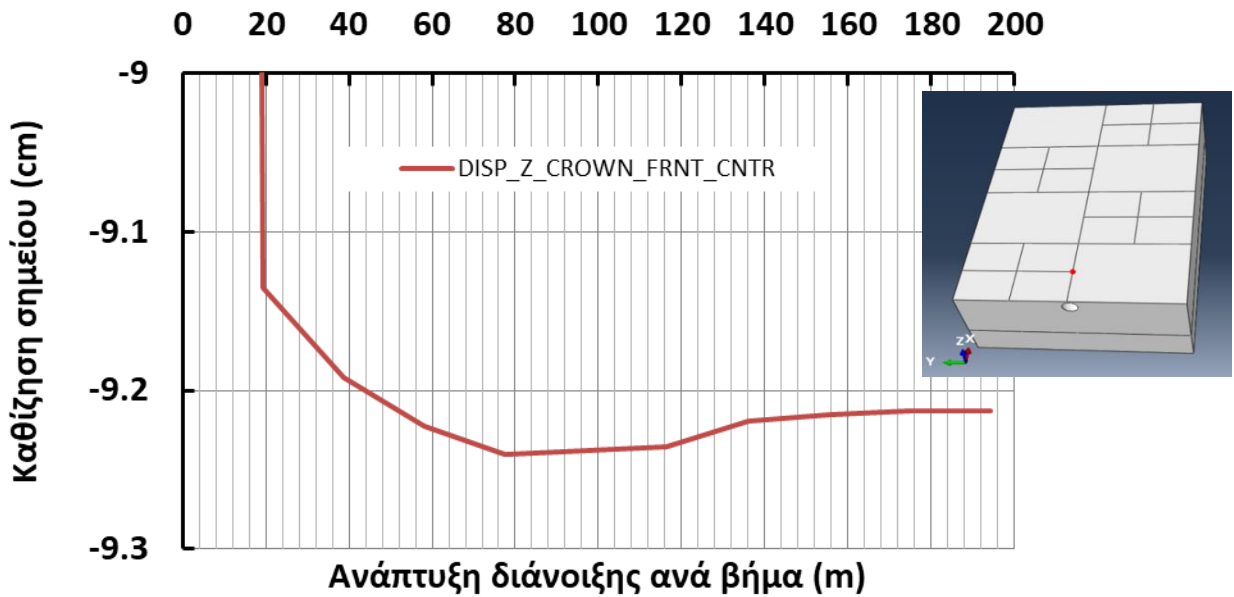
5.1 Περίπτωση αριθμητικής ανάλυσης 1^η – Αποτελέσματα Μηχανοποιημένης σήραγγας

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την 1^η περίπτωση ανάλυσης του αντίστοιχου αριθμητικού προσομοιώματος, με κύρια χαρακτηριστικά του πραγματικού έργου του μετρώ, αφορούν τις καθιζήσεις του εδάφους 17 (δεκαεπτά) επιλεγμένων σημείων εποπτείας. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται στο Κεφ.3 το μοντέλο του εδάφους διαχωρίζεται σε 3 (τρία) υποτμήματα όγκου μέσω 2 (δύο) επιφανειών τομής. Σε κάθε μία από τις επιφάνειες αυτές όπως και στην επιφάνεια του εδάφους πραγματοποιείται μία επιπλέον τμηματοποίηση διαμορφώνοντας καννάβους 2x4 επιφανειών. Για ορισμένες από τις διαμορφωμένες υποεπιφάνειες ορίζονται στο μέσο τους και σε άλλες επιλεγμένες θέσεις σημεία εποπτείας τα οποία μετά την διαδικασία της αριθμητικής ανάλυσης φέρουν ατομικές πληροφορίες για τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Συγκεκριμένα, για την επιφάνεια του εδάφους ορίστηκαν 5 (πέντε) σημεία και για κάθε μία από τις επιφάνειες τομής 6 (έξι).

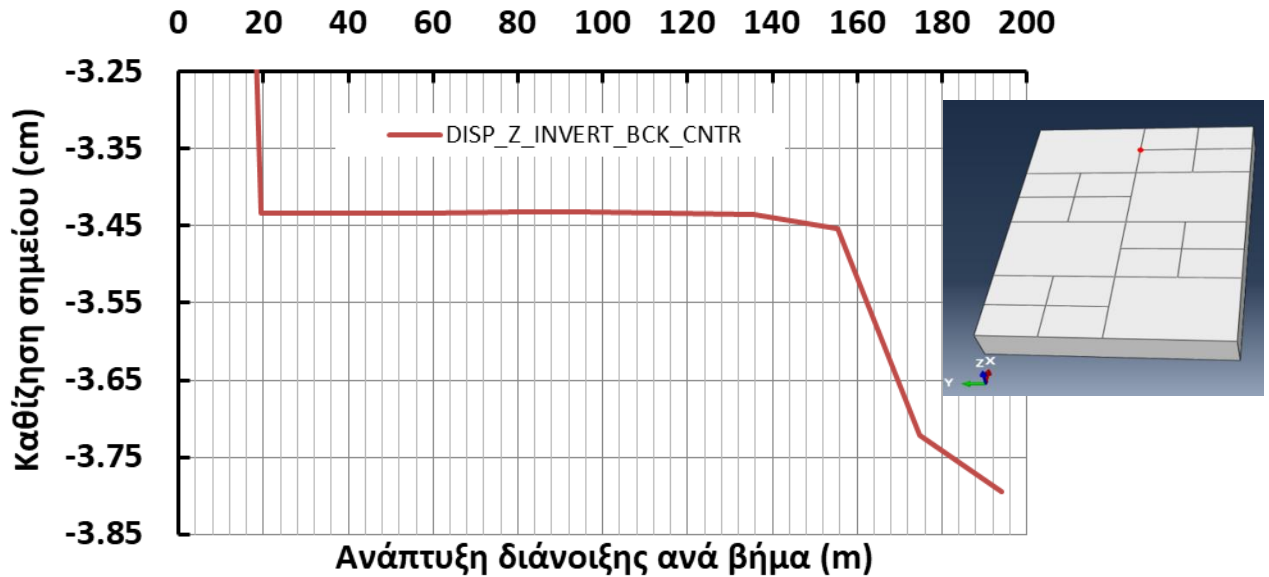
Οι δύο επιφάνειες που τέμνουν το μοντέλο του εδάφους βρίσκονται σε κατάλληλα βάθη ώστε να παρακολουθήσουν κυρίως για το αρχικό και το τελικό βήμα διάνοιξης τις παραμορφώσεις του εδάφους σε πολύ μικρή απόσταση από την επιφάνεια διάνοιξης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 3 (τρία) ενδεικτικά σημεία εποπτείας, 1 (ένα) ανά επιφάνεια, τα οποία φάνηκε να επηρεάζονται περισσότερο κατά την διαδικασία. Τα υπόλοιπα σημεία που βρίσκονται στις αντίστοιχες θέσεις αλλά σε διαφορετικές επιφάνειες παρουσίασαν παρόμοια μορφή συμπεριφοράς με τα σημεία, των οποίων παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, αλλά με ηπιότερες μεταβολές. Ορισμένα σημεία φάνηκε να επηρεάζονται αμελητέα λόγω της θέσης τους και της απόστασής τους από την περιοχή αλληλεπίδρασης.



Σχ. 5.1: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_MID_R της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



Σχ. 5.2: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



Σχ. 5.3: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου *DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR* της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης

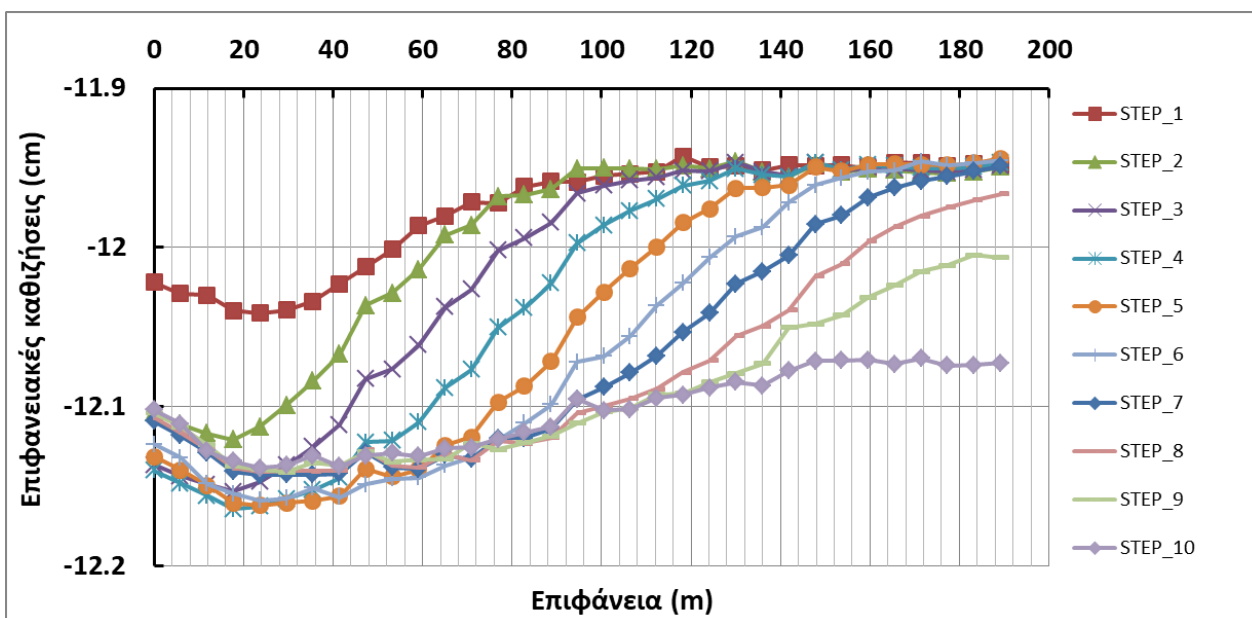
Το πρώτο γράφημα (Σχ. 5.1) αφορά την καθίζηση ενός επιλεγμένου σημείου της επιφάνειας του εδάφους (ground surface). Συγκεκριμένα, στο άξονα *x* παρουσιάζεται το μήκος ανάπτυξης της διαδικασίας ανά βήμα διάνοιξης και στον άξονα *y* η αντίστοιχη τιμή της καθίζησης του επιλεγμένου σημείου. Η μέγιστη καθίζηση του σημείου που προέκυψε κατά την ανάπτυξη της διάνοιξης υπό την επιβολή της καταπόνησης της υφιστάμενης δόμησης είναι 12.96cm και αναπτύσσεται κατά το όγδοο βήμα διάνοιξης. Η ελάχιστη τιμή της καθίζησης είναι 12.85cm και εμφανίζεται κατά τα 3 (τρία) αρχικά βήματα διάνοιξης. Το συγκεκριμένο σημείο ελέγχου βρίσκεται στην επιφάνεια, πάνω από το έκτο βήμα ανάπτυξης και η βαθμιαία μεταβολή της τιμής της καθίζησης (1.1mm) διακρίνεται, ξεκινά και ολοκληρώνεται σε απόσταση περίπου 2 (δύο) βημάτων πριν και 2 (δύο) βημάτων μετά.

Στο δεύτερο γράφημα (Σχ. 5.2) αποτυπώνεται η καθίζηση του επιλεγμένου σημείου της επιφάνειας που βρίσκεται 1m πάνω από το δεύτερο εγκατεστημένο τμήμα της σήραγγας (tunnel crown). Αντίστοιχα, η μέγιστη καθίζηση του σημείου που προέκυψε κατά την ανάπτυξη της διάνοιξης είναι 9.23cm και η ελάχιστη 9.13cm . Η μεταβολή της καθίζησης (1mm) συμβαίνει κατά τα 4 (τέσσερα) αρχικά βήματα διάνοιξης και εγκατάστασης (77m) με μια πιο ραγδαία εμφάνιση κατά τα 2 (δύο) αρχικά (0.6mm), ενώ αποκτά μία σταθερή τιμή κατά την υπόλοιπη διαδικασία.

Στο τρίτο γράφημα (Σχ. 5.3) αποτυπώνεται η καθίζηση του επιλεγμένου σημείου της επιφάνειας που βρίσκεται 1m κάτω από το ένατο εγκατεστημένο τμήμα της σήραγγας (tunnel invert). Η μέγιστη καθίζηση του σημείου που προέκυψε είναι 3.79cm και η ελάχιστη 3.43cm . Η διαφορά των δύο τιμών ήτοι 0.36cm (περίπου 4mm) οφείλεται στην διαδικασία διάνοιξης και την

εγκατάσταση της σήραγγας. Ακόμη, στο γράφημα παρατηρείται μία σταθερή τιμή της καθίζησης του σημείου καθ' όλη την ανάπτυξη της διάνοιξης που οφείλεται στην επιβαλλόμενη καταπόνηση των κτιρίων με τη μεταβολή της τιμής να συμβαίνει κατά τα 2 (δύο) τελευταία βήματα της διαδικασίας διάνοιξης όπου εμφανίζονται τα εγκατεστημένα τμήματα της σήραγγας.

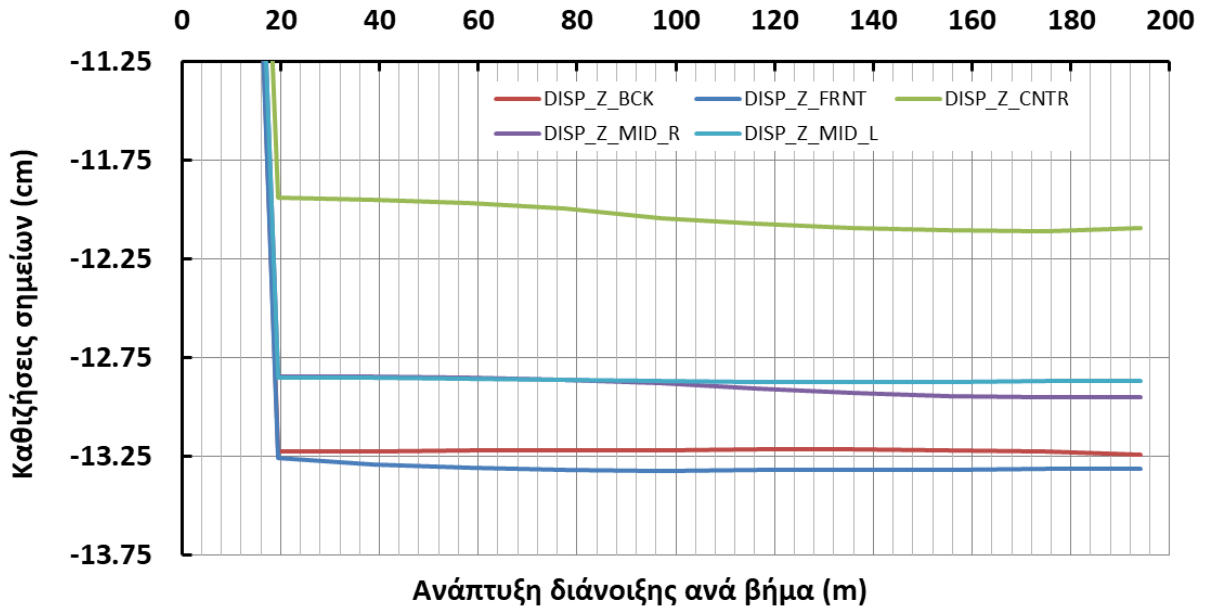
Η μορφή των παραπάνω γραφημάτων επαληθεύεται και μπορεί να εξαχθεί από την μορφή της παραμορφωμένης κατάστασης της επιφάνειας κατά την ανάπτυξη των βημάτων της διάνοιξης. Συγκεκριμένα οι κατά μήκος καθιζήσεις της επιφάνειας στον κεντρικό άξονα του μοντέλου του εδάφους κατά την ανάπτυξη της διάνοιξης προέκυψαν με την παρακάτω μορφή:



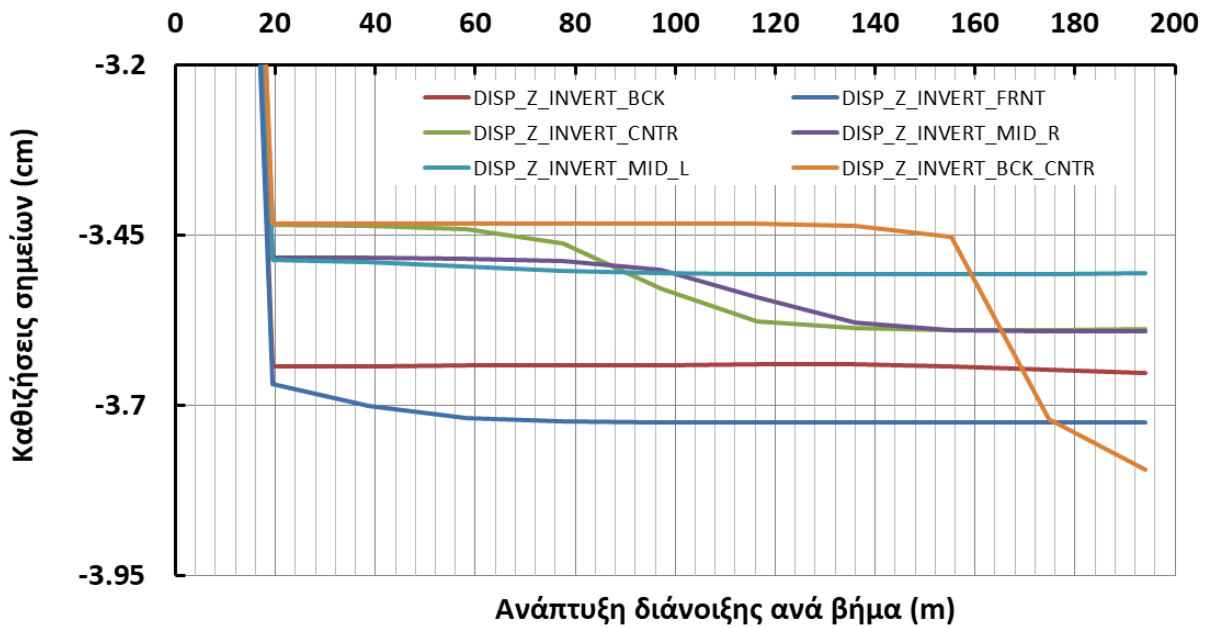
Σχ. 5.4: Γράφημα διαμηκών καθιζήσεων της επιφάνειας για κάθε βήμα διάνοιξης

Η παραπάνω μορφή (Σχ. 5.4) δείχνει την βαθμιαία μεταβολή των καθιζήσεων της επιφάνειας κατά την ανάπτυξη της διάνοιξης. Κάθε βήμα παρουσιάζει παρόμοια παραμορφωμένη εικόνα με σχεδόν σταθερή κλίση του μεταβαλλόμενου κλάδου εντός ενός εύρους βημάτων (βήμα 2-5) βάσει των συγκεκριμένων συνόρων του μοντέλου εδάφους. Η επιφάνεια του εδάφους υφίσταται καθίζηση πάνω και μπροστά από το μέτωπο της διάνοιξης, σε κάθε βήμα ανάπτυξης, με σταδιακή απομείωση της τιμής της μεταβολής της τείνοντας προς μία σταθερή τιμή πίσω από το μέτωπο.

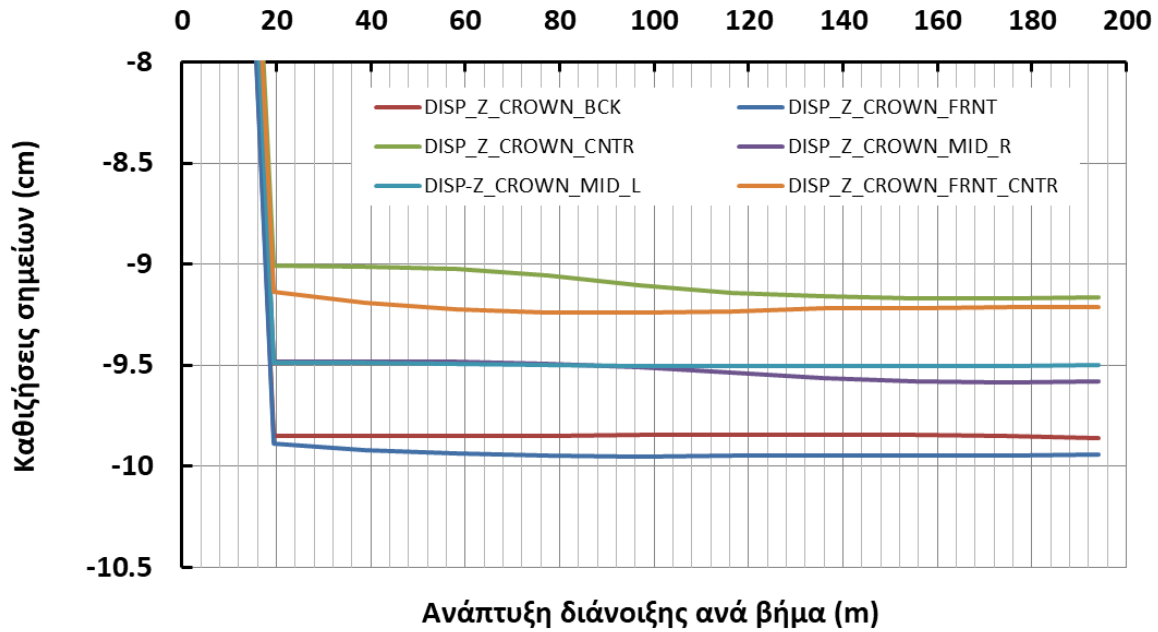
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των καθιζήσεων της ανάλυσης όλων των σημείων εποπτείας (Σχ. 5.5) (Σχ. 5.6) (Σχ. 5.7).



Σχ. 5.5: Γράφημα καθίζησης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



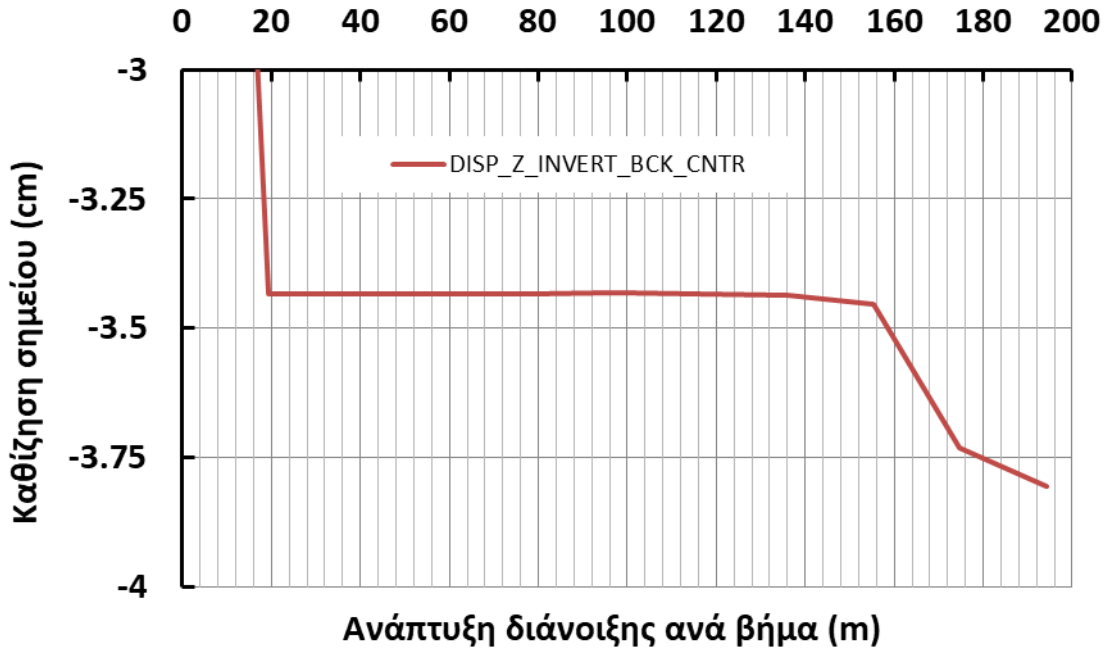
Σχ. 5.6: Γράφημα καθίζησης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας «INVERT» ανά βήμα διάνοιξης



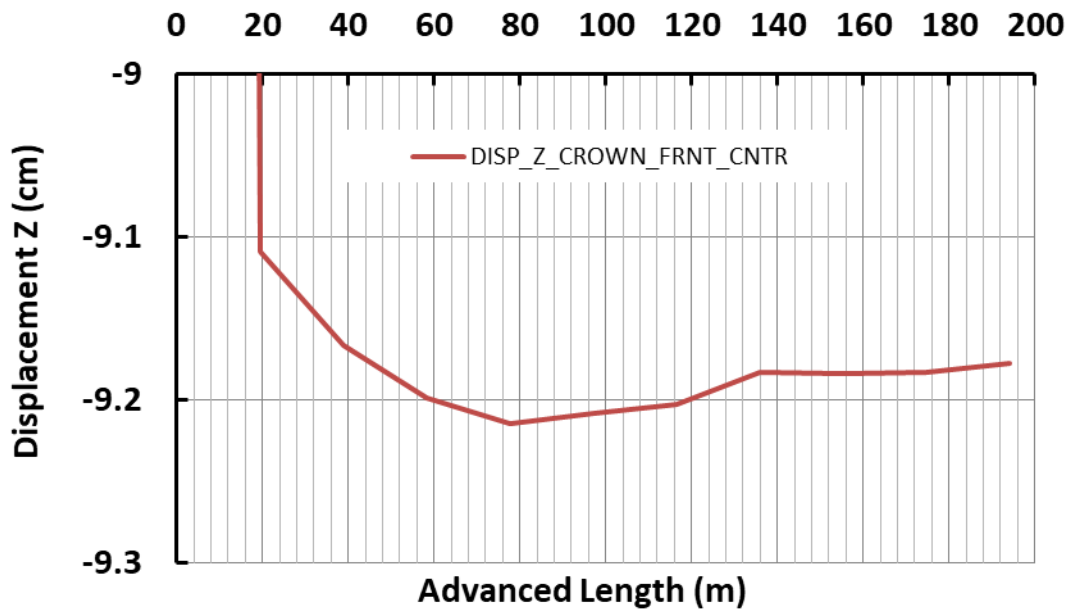
Σχ. 5.7: Γράφημα καθίζησης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας «CROWN» ανά βήμα διάνοιξης

5.2 Περίπτωση αριθμητικής ανάλυσης 2^η – Αποτελέσματα Ρηχής σήραγγας

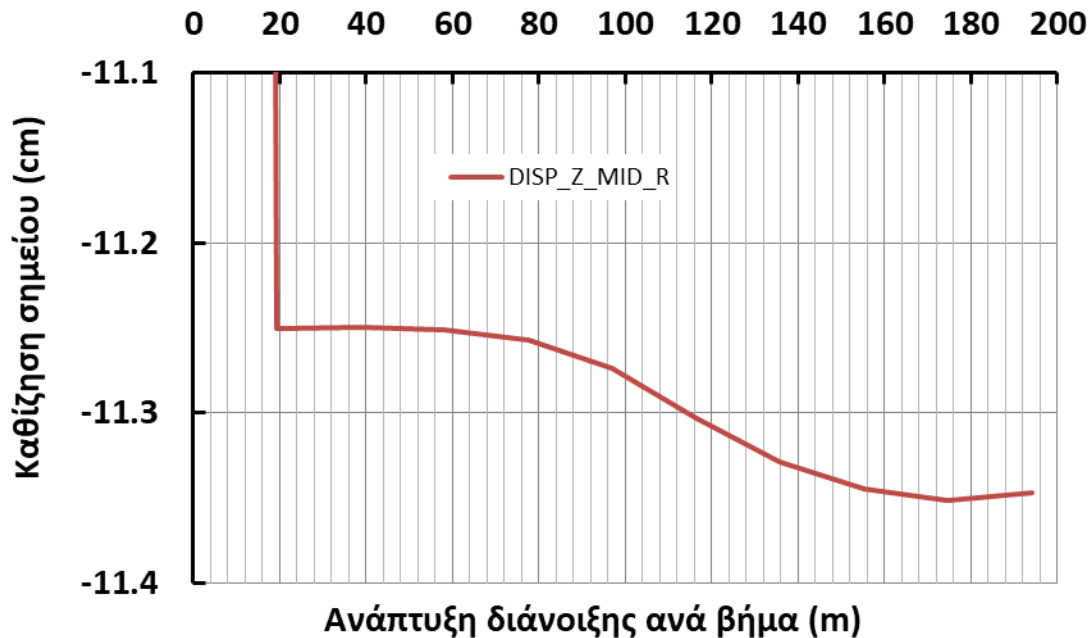
Για την περίπτωση του αριθμητικού μοντέλου της ρηχής σήραγγας προέκυψαν, έπειτα από την εφαρμογή της γραμμικής ελαστικής στατικής ανάλυσης, αποτελέσματα αντίστοιχου τύπου και μορφής όπως στην 1^η περίπτωση. Συγκεκριμένα για τα αντίστοιχα σημεία αναπτύχθηκαν τα εξής γραφήματα:



Σχ. 5.8: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



Σχ. 5.9: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



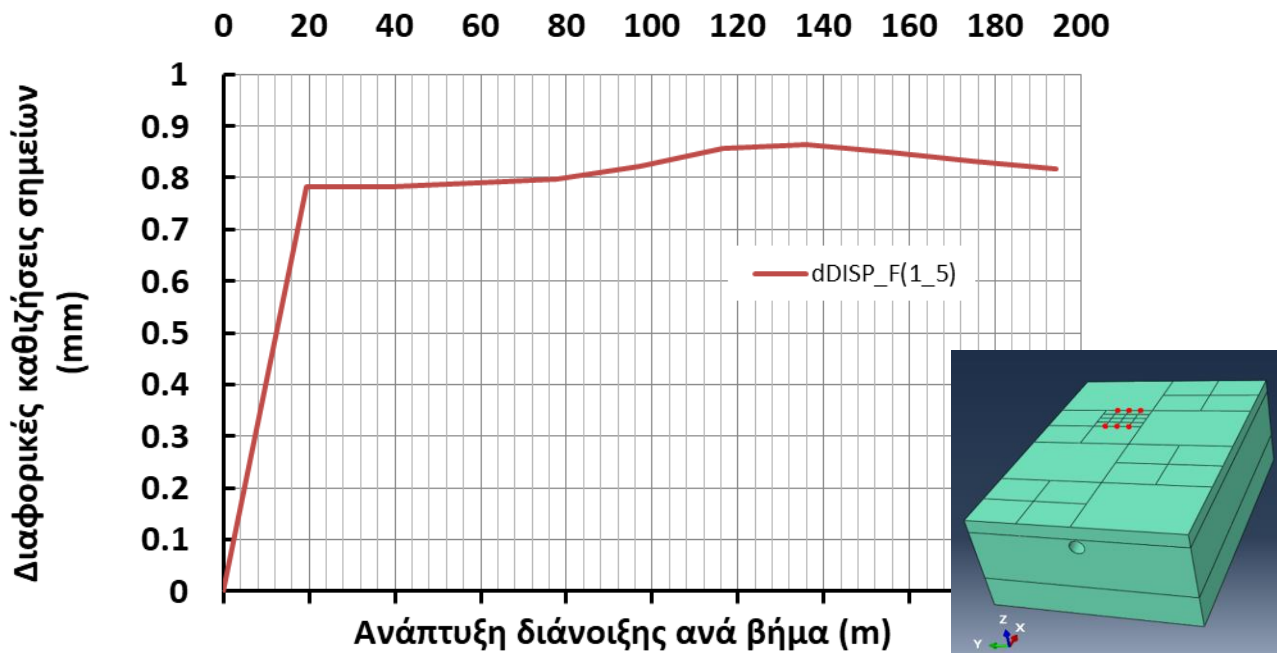
Σχ. 5.10: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_MID_R της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης

Στα παραπάνω γραφήματα (Σχ. 5.8) (Σχ. 5.9) (Σχ. 5.10) παρατηρείται απόκριση της ίδια μορφής όπως και στην 1^η περίπτωση. Η μόνη διαφορά συναντάται στις τιμές της αποδιδόμενης καθίζησης του σημείου ελέγχου της επιφάνειας και γενικότερα όλων των σημείων της επιφάνειας του συγκεκριμένου μοντέλου. Στην περίπτωση της ρηχής σήραγγας η μέγιστη καθίζηση του επιφανειακού σημείου ελέγχου είναι 11.35cm ενώ του αντίστοιχου της 1^{ης} περίπτωσης είναι 12.95cm. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ελαστική ανάλυση που πραγματοποιείται καθώς το ποσοστό της μείωσης του ύψους του μοντέλου εδάφους είναι σχεδόν ίσο με αυτό της μείωσης της καθίζησης. Στις υπόλοιπες δύο επιφάνειες/στάθμες οι καθιζήσεις παραμένουν σχεδόν ίδιες λόγω ελαστικής ανάλυσης.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης επιλέχθηκε επιπλέον κάρναβος 3x5 σημείων ελέγχου τα οποία συναντώνται από την διάνοιξη κατά το έκτο και έβδομο βήμα, που αφορά τα υποστηλώματα ενός κτιρίου στην επιφάνεια του εδάφους προς διερεύνηση των διαφορικών καθιζήσεων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία διάνοιξης.

Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι σειρές σημείων του κάρναβου με κωδικές ονομασίες $F1_{(R,C,L)}$ και $F5_{(R,C,L)}$ και οι στήλες $F(1..5)_R$ και $F(1..5)_L$ συνδυασμοί οι οποίοι αποτελούν τα πιο απομακρυσμένα σετ σημείων για τα οποία υπολογίζονται οι διαφορικές καθιζήσεις τους κατά την βηματική ανάπτυξη της διαδικασίας διάνοιξης. Οι διαφορικές καθιζήσεις των δύο συνδυασμών των σημείων προέκυψαν μέσω της διαφοράς του μέσου όρου των καθιζήσεων, ανά βήμα διάνοιξης, σε όρους απόλυτης τιμής, της σειράς $F1_{(R,C,L)}$ από την

$F5_{(R,C,L)}$ για τον πρώτο συνδυασμό και της στήλης $F(1..5)_R$ από την $F(1..5)_L$ για τον δεύτερο, αντίστοιχα. Προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα και γραφήματα:

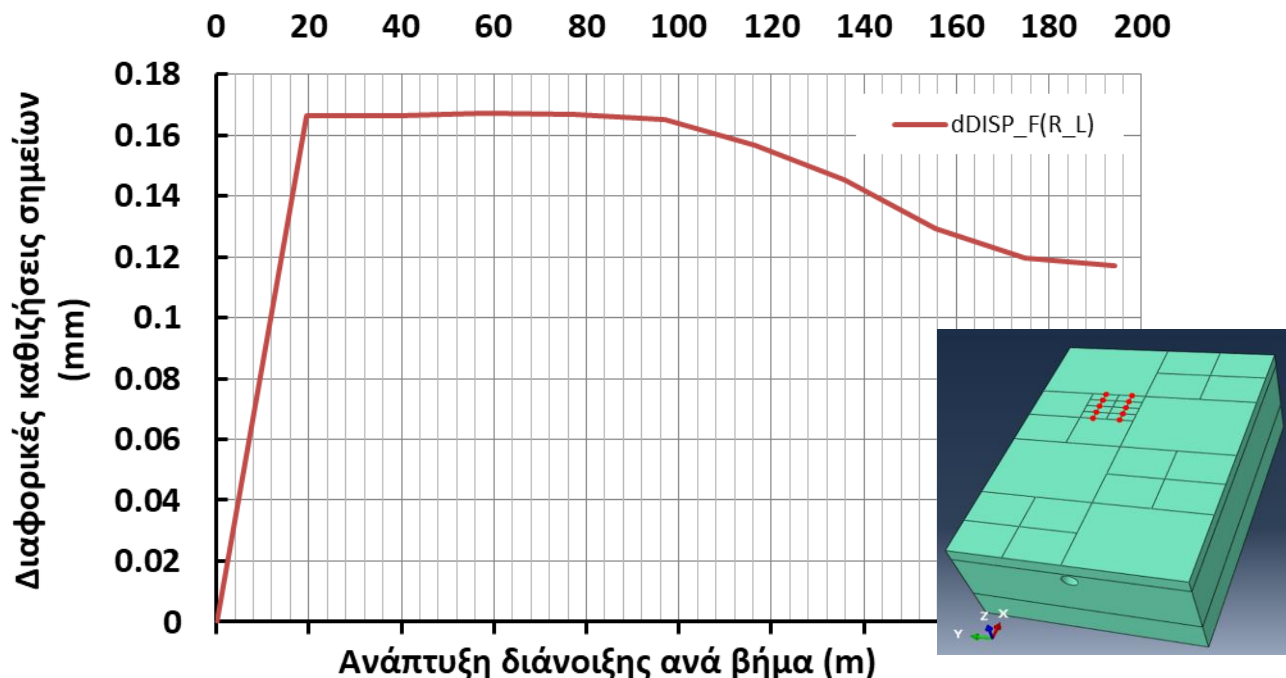


Σχ. 5.11: Διαφορική καθίζηση σημείων $F(1..5)$ ανά βήμα διάνοιξης

Το γράφημα (Σχ. 5.11) αποτυπώνει τις απόλυτες τιμές των διαφορικών καθιζήσεων των σειρών του καννάβου των σημείων $F1_{(R,C,L)}$ και $F5_{(R,C,L)}$ της επιφάνειας του εδάφους. Η τιμή της ελάχιστης διαφορικής καθίζησης είναι $0.78mm$ και εμφανίζεται στο πρώτο βήμα διάνοιξης παραμένοντας σταθερή έως το τρίτο. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται κατά το έβδομο βήμα διάνοιξης και είναι $0.865mm$.

Η μορφή της καμπύλης των διαφορικών καθιζήσεων μπορεί να εξηγηθεί μέσω του γραφήματος (Σχ. 5.4) των κατά μήκος καθιζήσεων του συνόλου της παραμορφωμένης επιφάνειας όπου η θέση των συγκεκριμένων σημείων δικαιολογεί μια σταθερή τιμή διαφορικής καθίζησης κατά τα πρώτα βήματα όπου τα σημεία επηρεάζονται μόνο από την επιφανειακή καταπόνηση. Η ανάπτυξη της διαδικασίας παραμορφώνει περισσότερο την επιφάνεια προκαλώντας βαθμιαία αύξηση των καθιζήσεων των σημείων που συναντάει πρώτα, εντός ενός εύρους μπροστά και πίσω από το μέτωπο της διάνοιξης. Όσο η διαδικασία συνεχίζει να εξελίσσεται και το μέτωπο να απομακρύνεται, το παραμορφωμένο έδαφος αποκτά μία σταθερή τιμή καθίζησης που δικαιολογεί την ήπια πτώση της καμπύλης και την βαθμιαία απομείωση των διαφορικών καθιζήσεων.

Ωστόσο οι συγκεκριμένες τιμές διαφορικών καθιζήσεων που αναπτύσσονται, ειδικά εκείνες που οφείλονται αποκλειστικά στην διαδικασία διάνοιξης, είναι αμελητέες. Μία άλλη μορφή ανάλυσης με μη γραμμικά χαρακτηριστικά ή διαφορετικές εδαφικές συνθήκες και μία λεπτομερέστερη προσομοίωση της ακριβούς δυσκαμψίας των κτιρίων και της αλληλεπίδρασης τους με το έδαφος θα οδηγούσε σε μεγαλύτερες τιμές από αυτές που προέκυψαν από την ελαστική ανάλυση και τα χαρακτηριστικά των κτιρίων και του αλληλεπιδρώντος συνδέσμου.



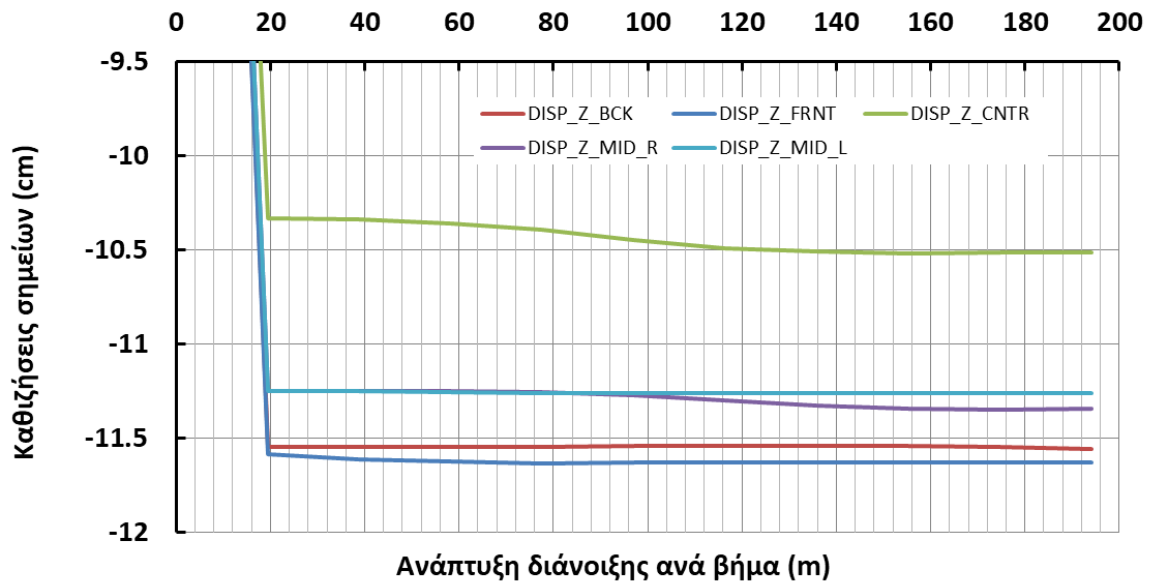
Σχ. 5.12: Διαφορική καθίζηση σημείων $F(R_L)$ ανά βήμα διάνοιξης

Οι απόλυτες τιμές της διαφορικής καθίζησης των σημείων των στηλών $F(1..5)_R$ και $F(1..5)_L$ του καννάβου απεικονίζονται με το γράφημα (Σχ. 5.12). Οι τιμές της διαφορικής καθίζησης προκύπτουν ακόμη μικρότερες για αυτόν τον συνδυασμό σημείων. Η μέγιστη διαφορική καθίζηση που αναπτύσσεται συμβαίνει κατά το πρώτο βήμα διάνοιξης. Η τιμή αυτή διατηρείται σταθερή έως το πέμπτο βήμα, από το οποίο και έπειτα ξεκινάει μία σταδιακή μείωση της τιμής της διαφορικής καθίζησης, λόγω της εμφάνισης του μετώπου διάνοιξης στη θέση των σημείων, έως το τελευταίο βήμα όπου αναπτύσσεται η ελάχιστη τιμή.

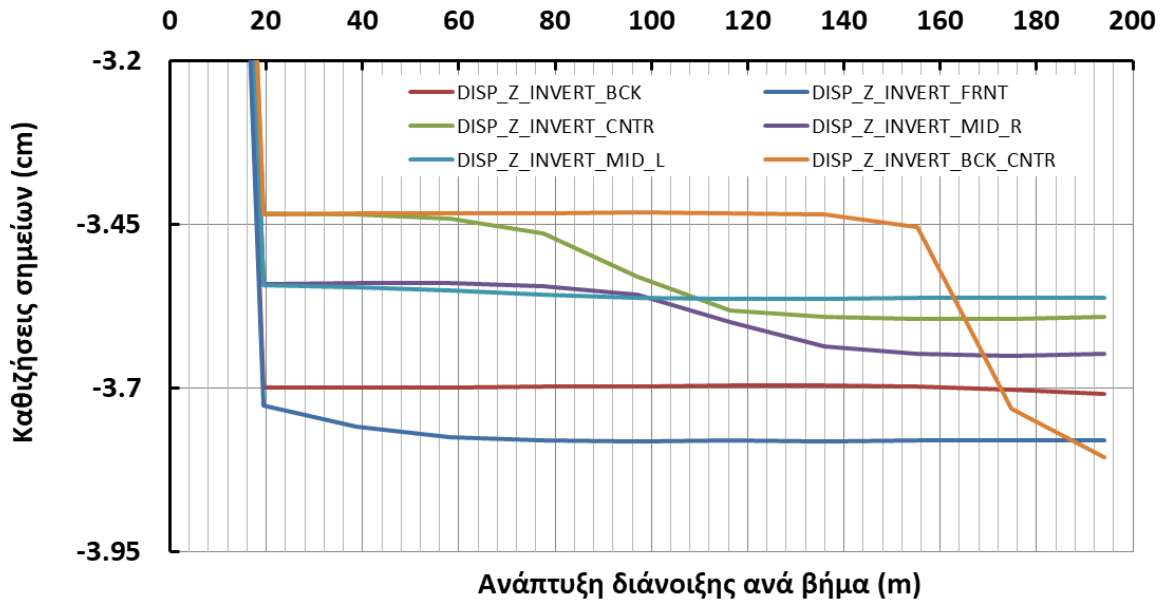
Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία διάνοιξης ανακουφίζει την διαφορά καθίζησης των σημείων, η οποία δημιουργείται από τον τρόπο επιβολής της επιφανειακής καταπόνησης καθώς η παρουσία του μετώπου διάνοιξης κάτω από την θέση των σημείων προσπαθεί να επιβάλλει

σχεδόν κοινή καθίζηση των σημείων που βρίσκονται πάνω από την διανοιγόμενη περιοχή, σε όρους εγκάρσιας παραμορφωμένης επιφανειακής κατάστασης.

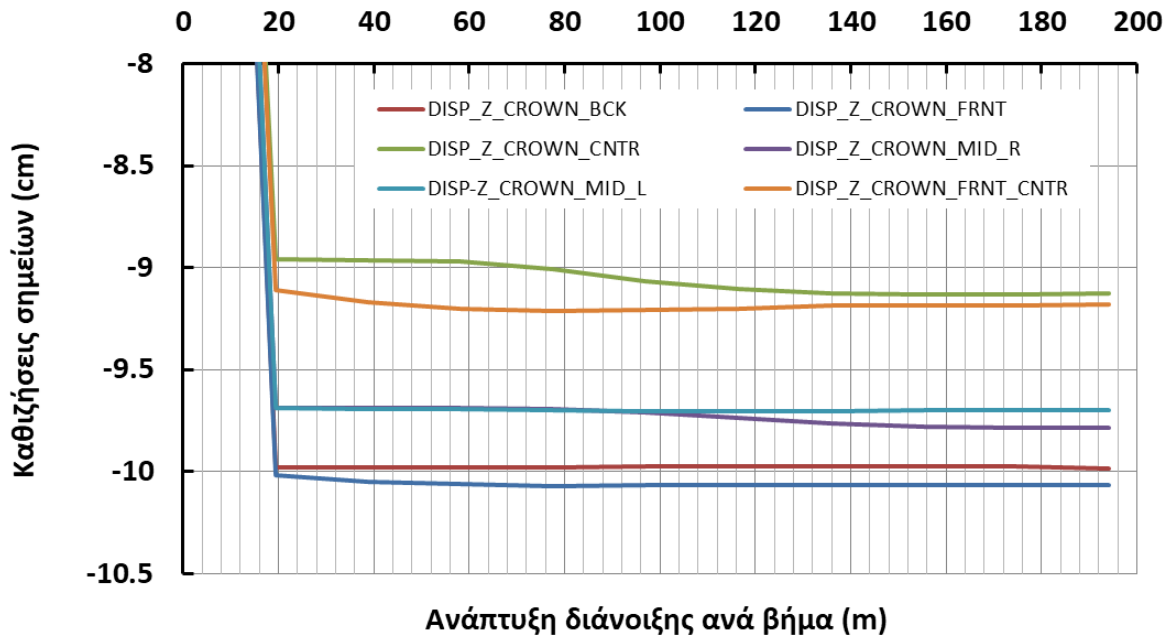
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των σημείων παρουσιάζονται παρακάτω (Σχ. 5.13) (Σχ. 5.14) (Σχ. 5.15).



Σχ. 5.13: Γράφημα καθίζησης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



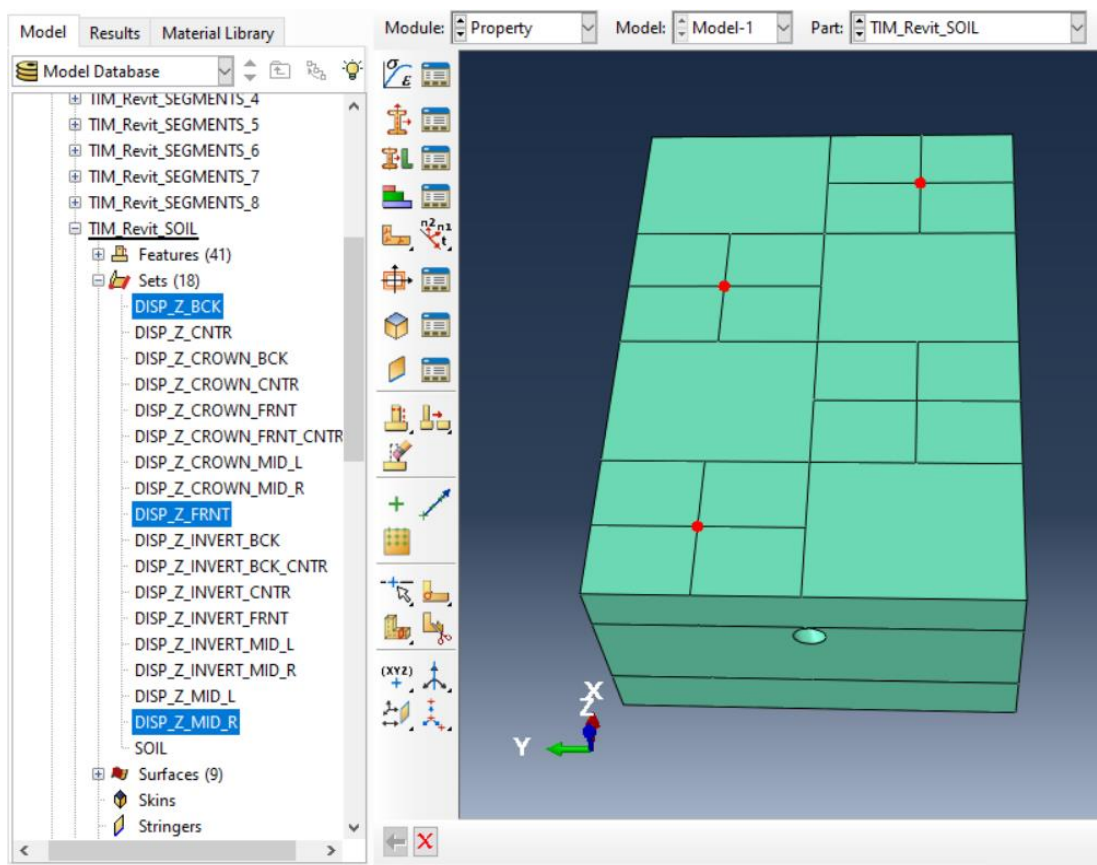
Σχ. 5.14: Γράφημα καθιζήσης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας «INVERT» ανά βήμα διάνοιξης



Σχ. 5.15: Γράφημα καθιζήσης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας «CROWN» ανά βήμα διάνοιξης

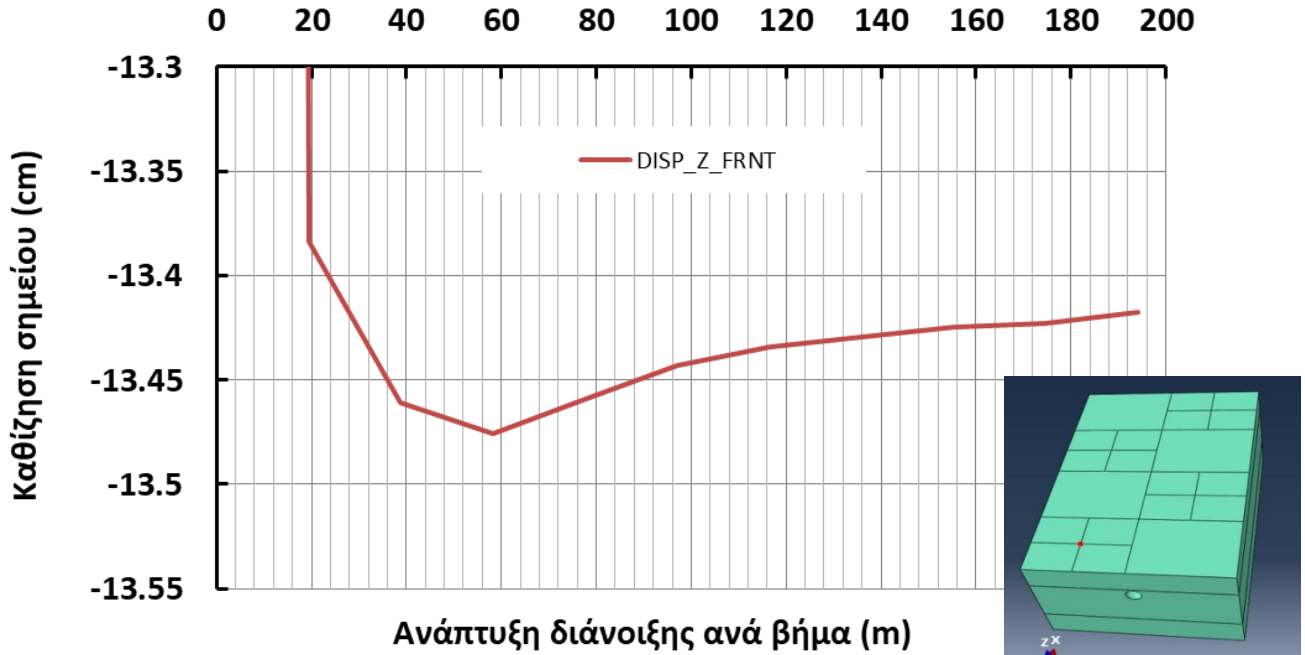
5.3 Περίπτωση αριθμητικής ανάλυσης 3^η – Αποτελέσματα Διαδικασίας διάνοιξης

Η συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης αφορά μια πιο ρεαλιστική απόδοση της διαδικασίας διάνοιξης. Εκτελέστηκε γραμμική ελαστική στατική ανάλυση και σε αυτή την περίπτωση. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 3 (τρία) σημεία ανά επιφάνεια εποπτείας, περισσότερο επηρεαζόμενα από τη διαδικασία, καθώς βρίσκονται σε θέσεις που παρακολουθούν την ανάπτυξη διάνοιξης. Συγκεκριμένα για την επιφάνεια του εδάφους εξετάζονται τα σημεία με κωδικές ονομασίες *DISP_Z_FRNT*, *DISP_Z_BCK*, *DISP_Z_MID_R* (Σχ. 5.16).

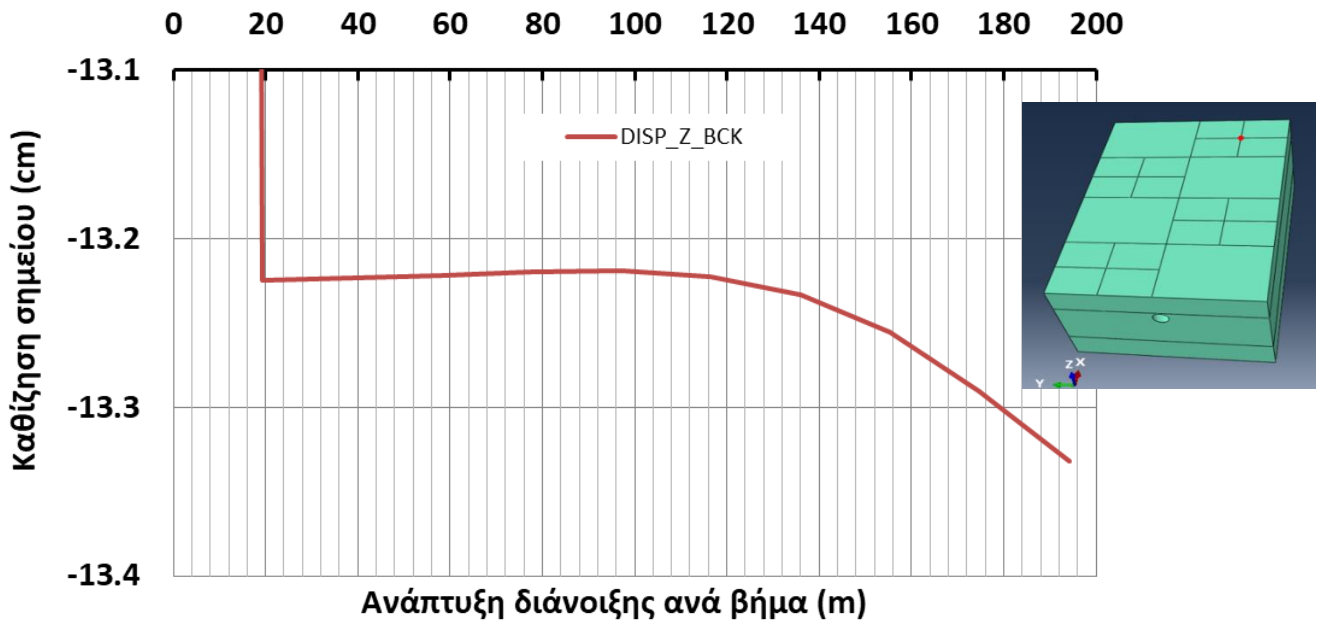


Σχ. 5.16: Επιλεγμένα σημεία ελέγχου της επιφάνειας του εδάφους

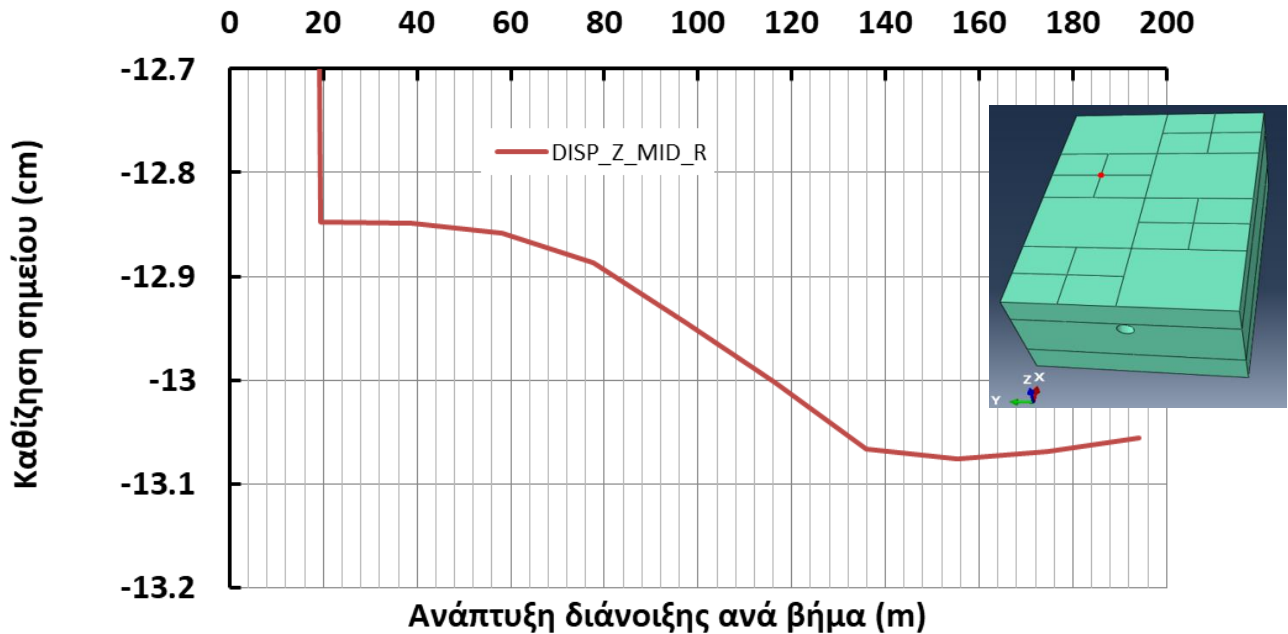
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα σημεία της επιφάνειας του εδάφους είναι τα εξής:



Σχ. 5.17: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_FRNT της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



Σχ. 5.18: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_BCK της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης



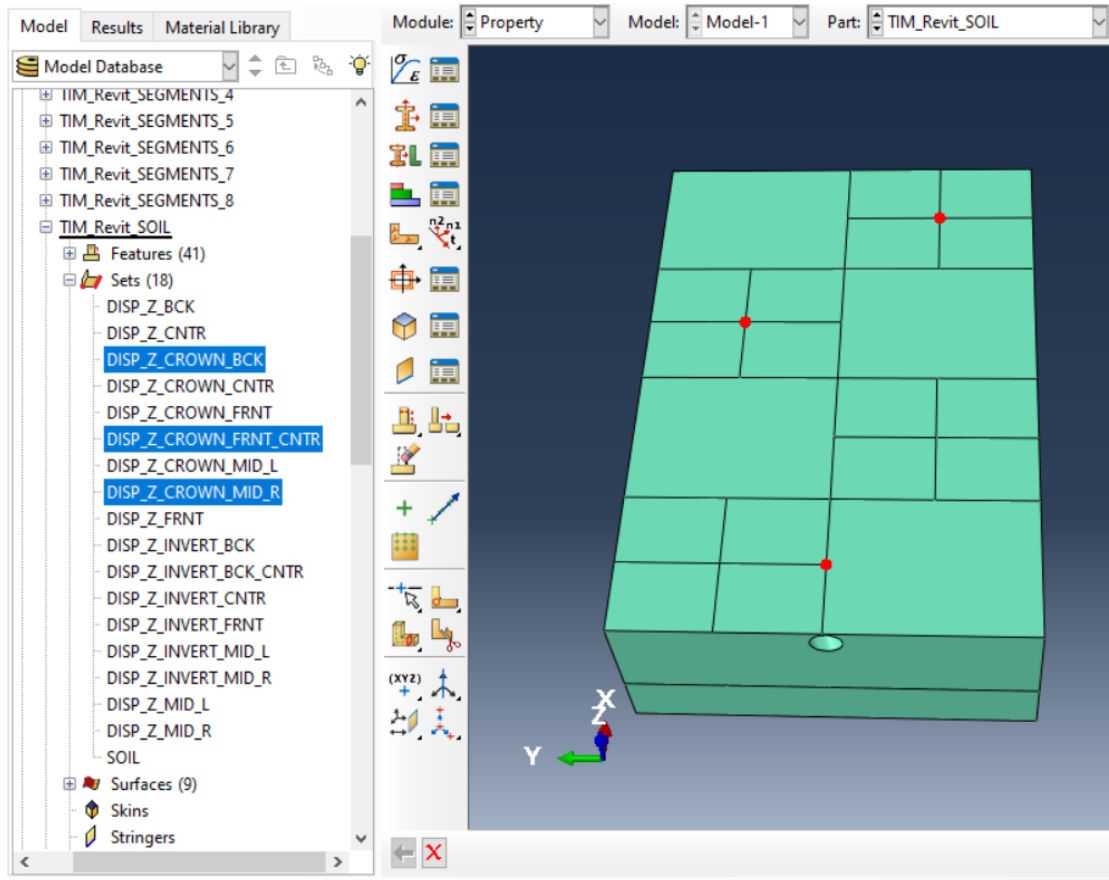
Σχ. 5.19: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου $DISP_Z_MID_R$ της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης

Το σημείο $DISP_Z_FRNT$ της επιφάνειας του εδάφους συναντάται από την διαδικασία διάνοιξης κατά τα αρχικά της βήματα. Το γράφημα (Σχ. 5.17) του σημείου αποτυπώνει καθίζηση $13.38cm$ κατά το πρώτο βήμα διάνοιξης και $13.46cm$ κατά το δεύτερο. Το σημείο υφίσταται την μεγαλύτερη μεταβολή της καθίζησής του ($0.8mm$) κατά τα δύο αυτά βήματα όπου συμβαίνει η εμφάνιση του μηχανήματος TBM και η διατάραξη του εδάφους και ακολούθως η εγκατάσταση του τμήματος της σήραγγας με επικάλυψη μη σκληρυμένου ενέματος. Η μέγιστη καθίζηση που εμφανίζεται είναι $13.48cm$ κατά το τρίτο βήμα με μειωμένο ρυθμό μεταβολής λόγω της προοδευτικής σκλήρυνσης του ενέματος ενώ από το τέταρτο βήμα έως το τελευταίο εμφανίζεται ένα ανασήκωμα στο γράφημα καθώς η σήραγγα λαμβάνει προοδευτικά την μόνιμή της μορφή.

Για το σημείο $DISP_Z_BCK$ (Σχ. 5.18) που συναντάται κατά τα τελευταία βήματα της διαδικασίας διάνοιξης, παρουσιάζεται ένα σταθερό προφίλ καθίζησης με μέγεθος $13.22cm$ η οποία προέρχεται από την καταπόνηση των κτιρίων της επιφάνειας. Κατά το έβδομο βήμα ξεκινάει η ανάπτυξη μιας μικρής μεταβολής έως το τελευταίο, κατά το οποίο συμβαίνει η μέγιστη καθίζηση που υφίσταται το σημείο, με μέγεθος $13.33cm$ και μέγιστη μεταβολή κατά $1.1mm$.

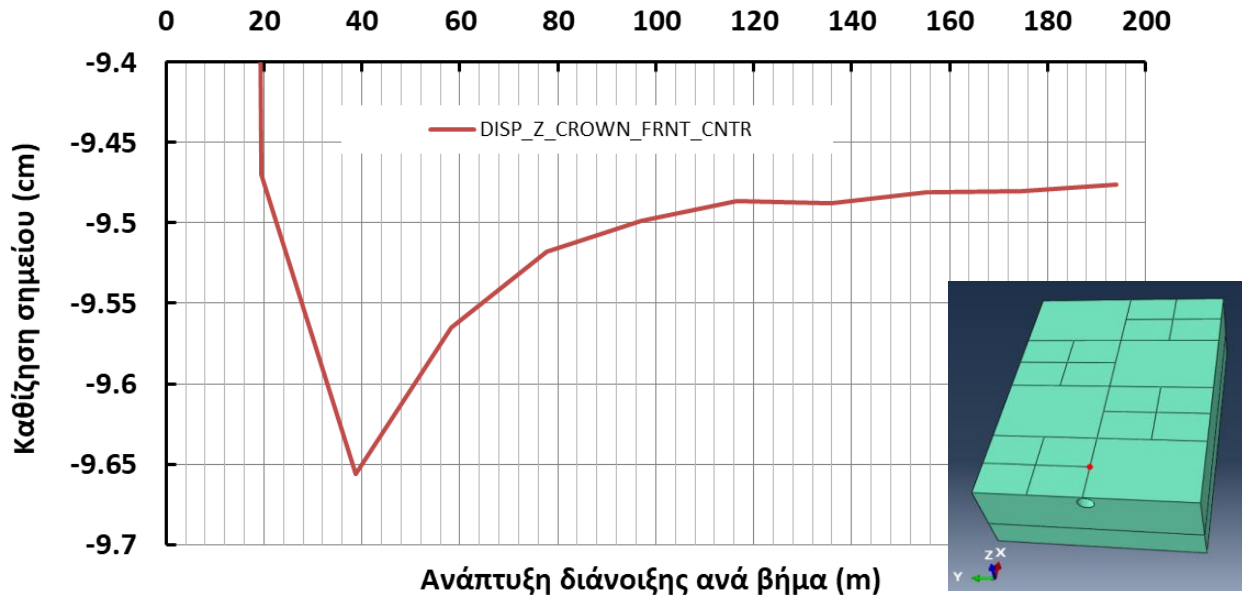
Το σημείο $DISP_Z_MID_R$ (Σχ. 5.19) συναντάται κατά το έκτο βήμα ανάπτυξης της διάνοιξης και παρουσιάζει μία βαθμιαία σταθερή μεταβολή καθίζησης συνολικού μεγέθους $2.1mm$ που ξεκινάει από το τρίτο βήμα και ολοκληρώνεται στο έβδομο όπου εμφανίζεται μια πτώση του ρυθμού μεταβολής έως την τιμή $13.13cm$ του τελευταίου βήματος.

Η επιφάνεια με τη χαρακτηριστική ονομασία «CROWN» που βρίσκεται στο επίπεδο με βάθος $1m$ πάνω από το πρώτο τμήμα του βήματος διάνοιξης, εξετάζει τα σημεία $DISP_Z_CROWN_BCK$, $DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR$, $DISP_Z_CROWN_MID_R$ (Σχ. 5.20).



Σχ. 5.20: Επιλεγμένα σημεία ελέγχου της επιφάνειας «CROWN»

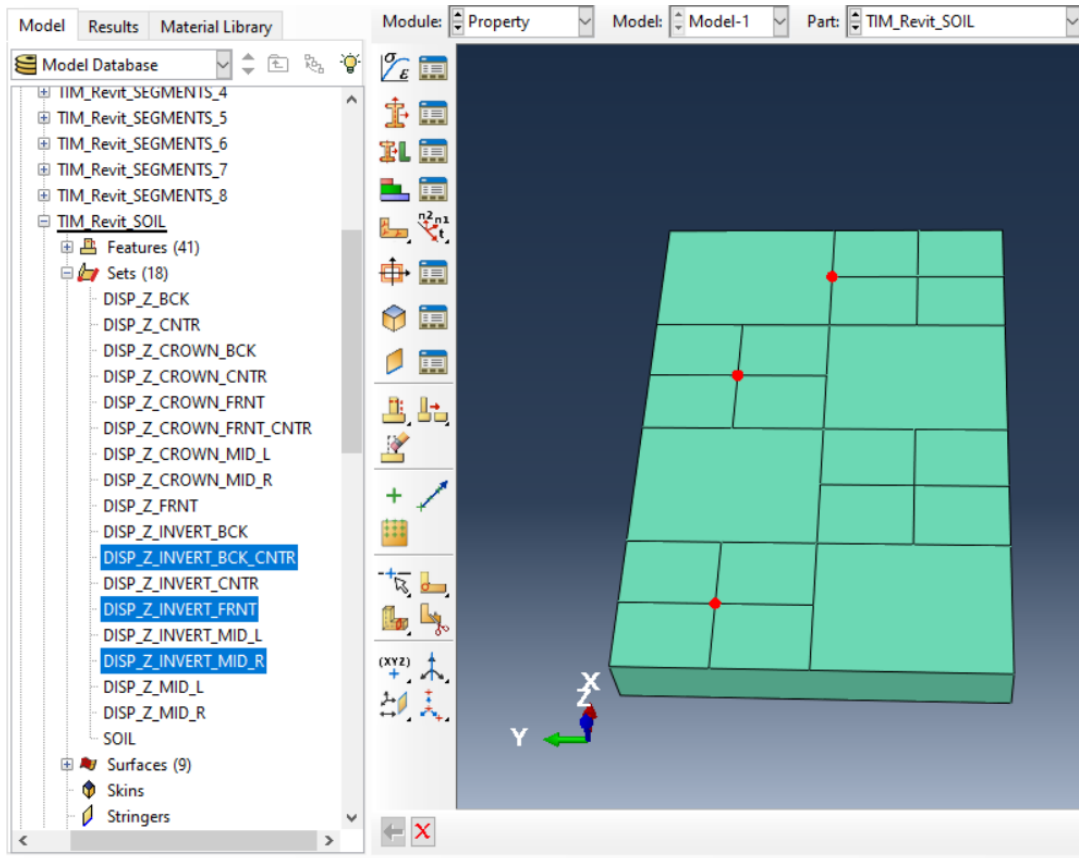
Τα σημεία $DISP_Z_INVERT_FRNT$ και $DISP_Z_INVERT_MID_R$ παρουσίασαν αντίστοιχη συμπεριφορά με τα σημεία της επιφάνειας του εδάφους. Συνεπώς παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα του σημείου $DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR$ καθώς το προφίλ καθιζήσεων του επηρεάστηκε περισσότερο λόγω της θέσης του σε απόσταση $1m$ κάτω από το ένατο βήμα διάνοιξης. Το γράφημα που προέκυψε είναι το εξής:



Σχ. 5.21: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου *DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR* της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης

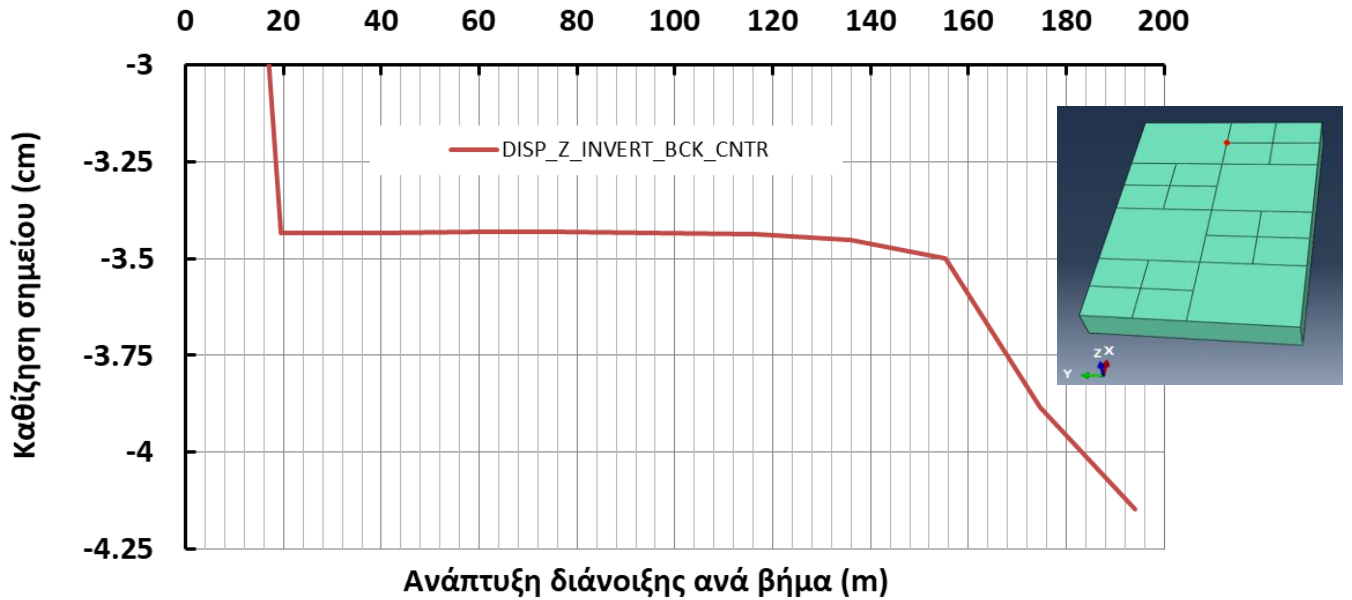
Το σημείο *DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR* βρίσκεται αρκετά κοντά στην περιοχή διάνοιξης σε απόσταση $1m$ πάνω από την εκτέλεση του δεύτερου βήματος. Το γράφημα (Σχ. 5.21) του σημείου παρουσιάζει κατά το δεύτερο βήμα διάνοιξης μία ραγδαία μεταβολή καθίζησης λόγω της παρουσίας του χαλαρού εδάφους που αναπαριστά το διανοιγόμενο κενό. Συγκεκριμένα, κατά το πρώτο βήμα το σημείο υφίσταται καθίζηση $9.47cm$ ενώ στο δεύτερο $9.67cm$ και μεταβολή κατά $2mm$, που αποτελεί υπερδιπλάσιο μέγεθος μεταβολής συγκριτικά με το αντίστοιχο σημείο της επιφάνειας (*DISP_Z_FRNT*). Κατά το τρίτο βήμα παρατηρείται ένα εξίσου ραγδαίο ανασήκωμα ($1.1mm$) έως την τιμή $9.56cm$ καθώς το ένεμα του πρώτου τμήματος αποκτά τη μόνιμη σκληρυμένη μορφή του. Το ανασήκωμα συνεχίζει να συμβαίνει σταδιακά μέχρι το έκτο βήμα διάνοιξης όπου αποκτάται η σταθερή τιμή καθίζησης $9.47cm$ μέχρι και το τελευταίο βήμα.

Τέλος για την επιφάνεια με τη χαρακτηριστική ονομασία «*INVERT*» εξετάστηκαν μεταξύ άλλων τα προφίλ των καθιζήσεων των σημείων *DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR*, *DISP_Z_INVERT_FRNT*, *DISP_Z_INVERT_MID_R* (Σχ. 5.22).



Σχ. 5.22: Επιλεγμένα σημεία ελέγχου της επιφάνειας «INVERT»

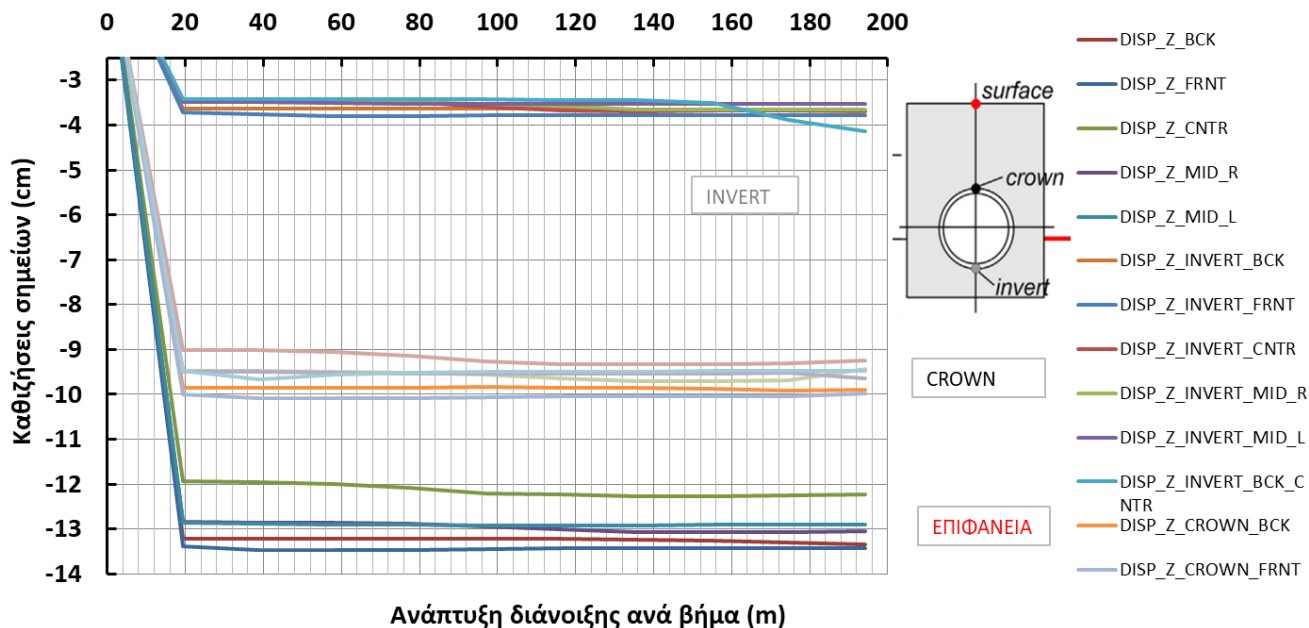
Τα σημεία *DISP_Z_INVERT_FRNT* και *DISP_Z_INVERT_MID_R* παρουσίασαν αντίστοιχη συμπεριφορά με τα σημεία της επιφάνειας του εδάφους και της επιφάνειας «CROWN». Συνεπώς παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα του σημείου *DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR* καθώς το προφίλ καθιζήσεων του επηρεάστηκε περισσότερο λόγω της θέσης του σε απόσταση 1m κάτω από το ένατο βήμα διάνοιξης. Το γράφημα που προέκυψε είναι το εξής:



Σχ. 5.23: Γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου *DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR* της επιφάνειας ανά βήμα διάνοιξης

Το γράφημα (Σχ. 5.23) παρουσιάζει μια σταθερή εικόνα της τιμής της καθίζησης του σημείου η οποία διαμορφώνεται σε 3.43cm έως το έβδομο βήμα όπου συμβαίνει μια μικρή μεταβολή. Η παρουσία του μηχανήματος TBM στο δέκατο βήμα διάνοιξης και η διατάραξη που συμβαίνει προκαλούν την μέγιστη τιμή καθίζησης του σημείου με τιμή 4.15cm και την μέγιστη ραγδαία μεταβολή με τιμή 6.6mm σε σχέση με την καθίζηση του όγδοου βήματος (3.49cm). Η μεταβολή της καθίζησης που συνέβη στο σημείο είναι λίγο κάτω από 6 (έξι) φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τα αντίστοιχα σημεία της επιφάνειας του εδάφους και της επιφάνειας εποπτείας «CROWN».

Και σε αυτή την περίπτωση διάνοιξης οι τιμές καθιζήσεων των υπόλοιπων σημείων δεν απέδωσαν μεγάλες μεταβολές λόγω της απόστασης τους από την περιοχή αλληλεπίδρασης κατά την διάνοιξη. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα (Σχ. 5.24).



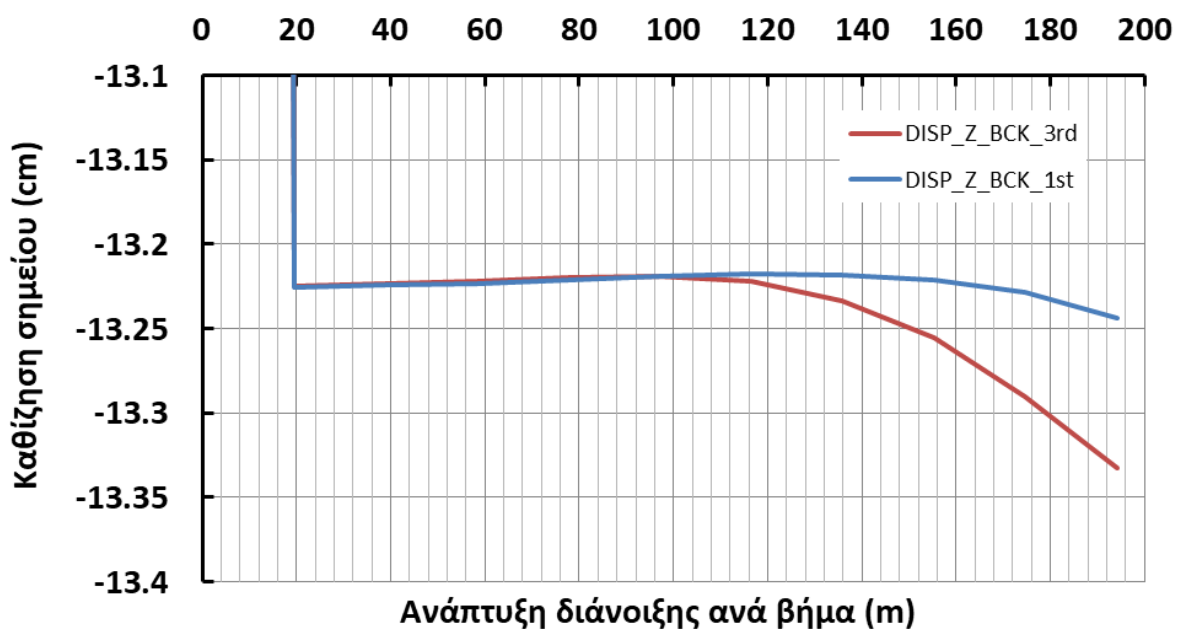
Σχ. 5.24: Συγκεντρωτικό γράφημα καθίζησης των σημείων ελέγχου της επιφάνειας του εδάφους, της επιφάνειας «INVERT» και της επιφάνειας «CROWN» ανά βήμα διάνοιξης

5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Περιπτώσεις αριθμητικής ανάλυσης 1^η – 3^η

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω των αριθμητικών αναλύσεων για την κάθε περίπτωση απέδωσαν μία ερμηνεία σχετική με τις παραμορφώσεις που υφίσταται το έδαφος κατά την διαδικασία διάνοιξης της μεθόδου μηχανοποιημένης σήραγγας. Η κάθε περίπτωση αποσκοπούσε στο να αναδείξει την έννοια μιας συνολικής και εκτεταμένης αντιμετώπισης και προσέγγισης της διαδικασίας διάνοιξης και υλοποίησης το έργου μέσω της μεθόδου που αναπτύχθηκε καθώς και την ευελιξία που παρέχεται σχετικά με την ενδεχόμενη διαφοροποίηση παραγόντων και συνθηκών. Εκτός από την μεμονωμένη εξέταση των αποτελεσμάτων, προκύπτουν σημαντικά στοιχεία και διαπιστώσεις μέσω της σύγκρισης των περιπτώσεων ανάλυσης.

Συγκεκριμένα η 1^η και η 3^η περίπτωση, όπως έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, αφορούν το ίδιο γενικό πλαίσιο της φιλοσοφίας προσέγγισης της διαδικασίας διάνοιξης, διαφέρουν όμως στον τρόπο απόδοσης και διατύπωσης της. Στην 3^η περίπτωση ένα ίδιο βήμα ανάπτυξης της διαδικασίας διάνοιξης επιμερίζεται σε περισσότερες ενέργειες και διαμορφώνονται περισσότερες και διαφορετικές συνθήκες αλληλεπίδρασης που απασχολούν περισσότερους παράγοντες. Η σύγκριση μεταξύ τους συμβαίνει για να εξετάσει αν τα παραπάνω αποδίδουν διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία ταυτόχρονα συμβαίνει να επηρεάζονται και να οφείλονται σε περισσότερες παραμέτρους.

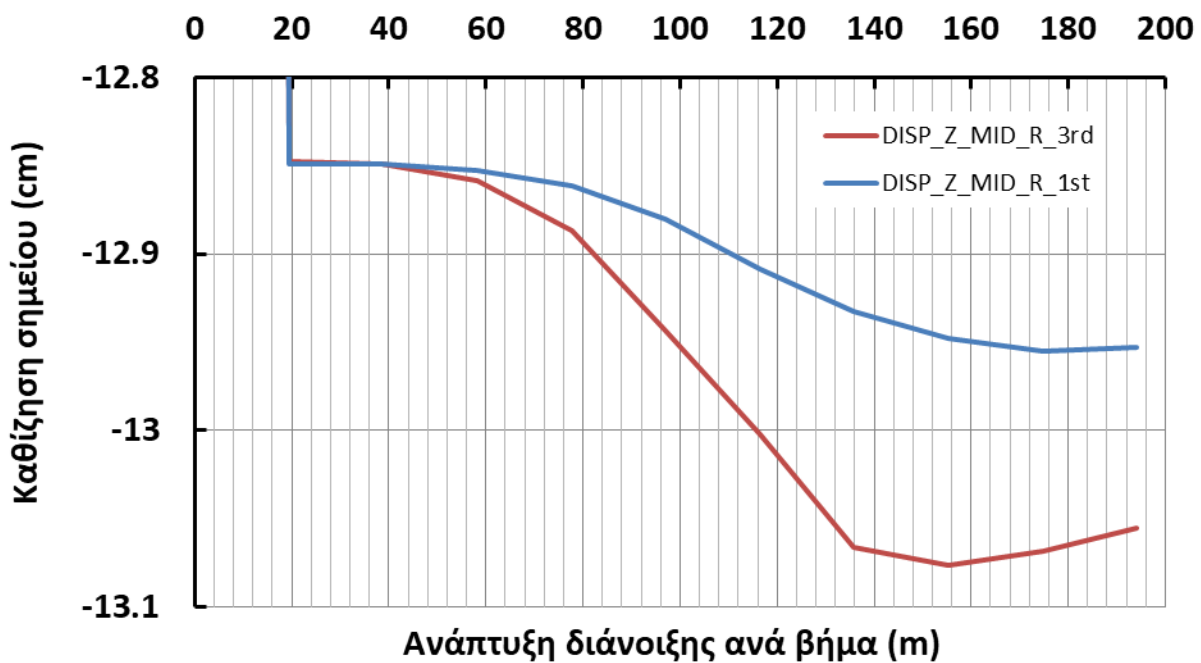
Η σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων αφορά εκτός από τα αποτελέσματα και την συνολική τους διαδρομή έως το στάδιο απόδοσης αποτελεσμάτων. Σχετικά με την ανάπτυξη των μοντέλων των γεωμετριών που συμμετέχουν στις αναλύσεις, δεν υπήρχε μεγάλη διαφοροποίηση, καθώς ο κώδικας που δημιουργήθηκε περιλαμβάνει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά και σε συνδυασμό με την συνολική παραμετρική μοντελοποίηση προσφέρει την απαραίτητη ευελιξία για την εναλλαγή, την προσθήκη ή την αφαίρεση σε μαζικό ή ατομικό επίπεδο των συστατικών στοιχείων των προσομοιωμάτων. Ωστόσο το στάδιο της προετοιμασίας του προσομοιώματος ήταν περισσότερο απαιτητικό για την 3^η περίπτωση καθώς περιλαμβάνει αντίστοιχα, περισσότερα συστατικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, απαιτήθηκαν περισσότερες συνθήκες σύνδεσης, κατάλληλης λειτουργίας, προς διαμόρφωση ενός ενιαίου συνόλου αλληλεπίδρασης των γεωμετριών και συνεπώς πυκνότερο δίκτυο διακριτοποίησης. Κατ' επέκταση αυξήθηκε το υπολογιστικό φορτίο και ο χρόνος ανάλυσης. Σε ότι αφορά τα αποτελέσματά των αναλύσεων, των προς σύγκριση περιπτώσεων, παρουσιάζονται παρακάτω σχετικά γραφήματα.



Σχ. 5.25: Συγκριτικό γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου *DISP_Z_BCK* της επιφάνειας του εδάφους, μεταξύ των περιπτώσεων ανάλυσης 1 (ένα) και 3 (τρία) ανά βήμα διάνοιξης

Κατά το γράφημα (Σχ. 5.25) το σημείο *DISP_Z_BCK* της επιφάνειας του εδάφους παρουσιάζει στην πρώτη περίπτωση ανάλυσης μία ομαλή απόκριση με σταθερή τιμή καθίζησης έως το όγδοο βήμα διάνοιξης όπου συμβαίνει αύξηση της καθίζησης με τη μέγιστη μεταβολή, κατά $0.24mm$. Εμφανίζει μέγιστη καθίζηση με τιμή $13.244cm$ κατά το τελευταίο βήμα, λόγω επιβολής του επιφανειακού φορτίου και της διαδικασίας διάνοιξης και σχεδόν σταθερή, έως το

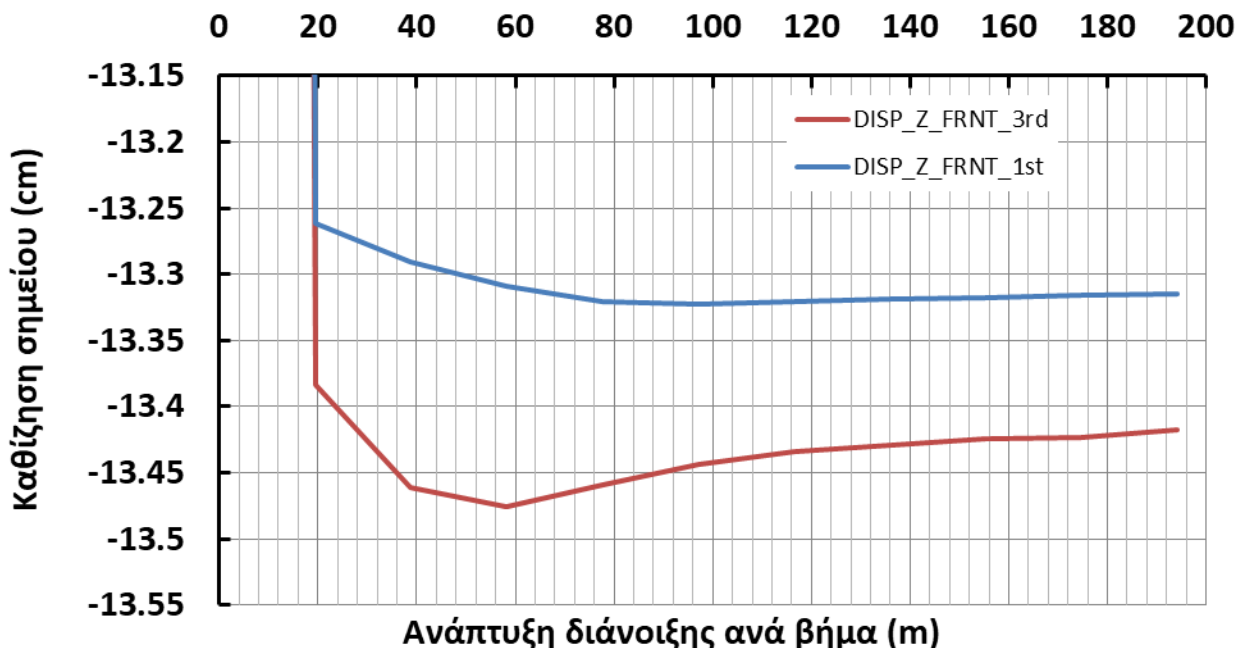
όγδοο βήμα, ελάχιστη τιμή 13.22cm . Στην 3^η περίπτωση ανάλυσης το ίδιο σημείο έχει παρόμοια χαρακτηριστικά στην μορφή της απόκρισής του με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση η μεταβολή της καθίζησής είναι μεγαλύτερη και συμβαίνει ραγδαία. Συγκεκριμένα, η μεταβολή εμφανίζεται, σε αυτή την περίπτωση, με ήπιο βαθμό κατά 1 (βήμα) πριν, όπου συμβαίνει καθίζηση 13.23cm με απότομη πτώση στα 13.33cm τιμή που αποτελεί την μέγιστη καθίζηση, κατά το δέκατο βήμα (μεταβολή κατά 1mm). Ακόμη στο γράφημα παρατηρείται ότι η μέγιστη διαφορά στην πορεία της καθίζησης του σημείου μεταξύ των περιπτώσεων είναι 0.9mm κατά το δέκατο βήμα, τιμή περίπου 3.5 (τρισήμισυ) φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη μεταβολή που υφίσταται το σημείο λόγω της διαδικασίας διάνοιξης, στην 1^η περίπτωση.



Σχ. 5.266: Συγκριτικό γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου $DISP_Z_MID_R$ της επιφάνειας του εδάφους, μεταξύ των περιπτώσεων ανάλυσης 1 (ένα) και 3 (τρία) ανά βήμα διάνοιξης

Το γράφημα (Σχ. 5.26) αποτυπώνει την διαφοροποίηση των τιμών της καθίζησης του σημείου της επιφάνειας με κωδική ονομασία $DISP_Z_MID_R$ για τις υπό σύγκριση περιπτώσεις. Η μορφή της βαθμιαίας μεταβολής της καθίζησης είναι κοινή και στις 2 (δύο) περιπτώσεις με την εμφάνιση της ίδιας, ελάχιστης, σταθερής για τα 3 (τρία) πρώτα βήματα, τιμής 12.85cm . Οι δύο περιπτώσεις διαφέρουν στην τιμή της μέγιστης τιμής καθίζησης, όπου για την 1^η αναπτύσσεται η τιμή 12.95cm ενώ για την 3^η η τιμή 13.08cm ήτοι διαφορά 1.3mm . Ακόμη, είναι προφανές ότι η βαθμιαία μεταβολή της καθίζησης συμβαίνει υπό μεγαλύτερη κλίση στην 3^η περίπτωση. Στην περίπτωση του σημείου αυτού από το όγδοο βήμα και μετά παρατηρείται ανασήκωμα του

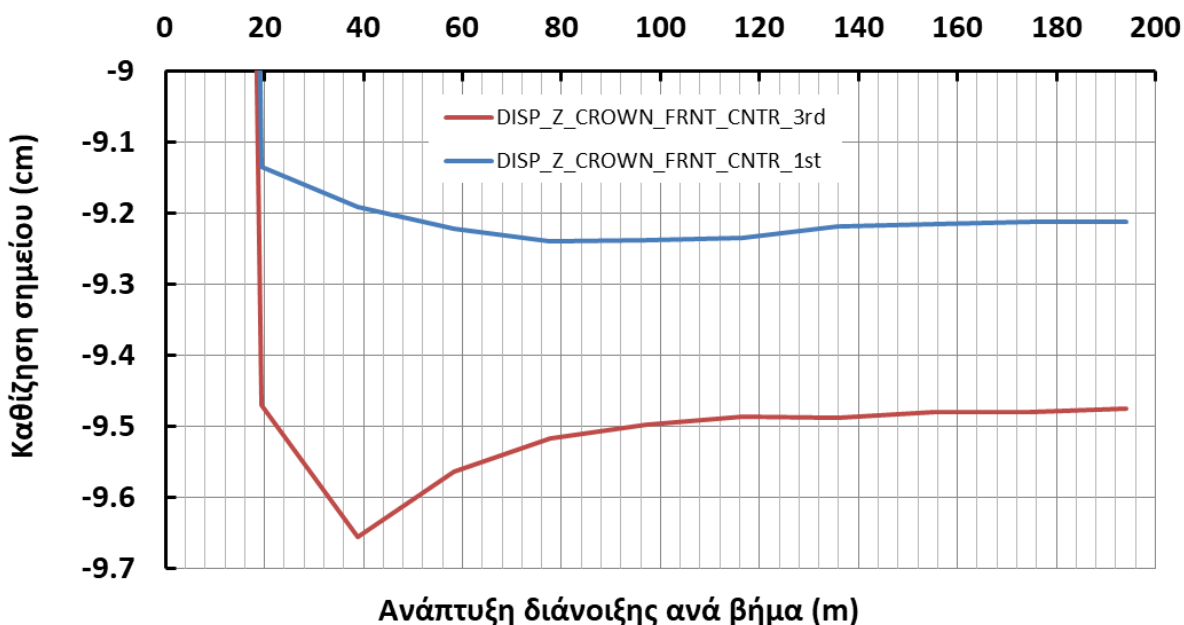
σημείου, λόγω της ιδιότητας σκλήρυνσης του ενέματος και της επιρροής που φαίνεται να έχει στις καθιζήσεις της επιφάνειας.



Σχ. 5.277: Συγκριτικό γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου DISP_Z_FRNT της επιφάνειας του εδάφους, μεταξύ των περιπτώσεων ανάλυσης 1 (ένα) και 3 (τρία) ανά βήμα διάνοιξης

Το γράφημα (Σχ. 5.27) του σημείου της επιφάνειας του εδάφους με κωδική ονομασία DISP_Z_FRNT παρουσιάζει εμφανή διαφοροποίηση από το πρώτο βήμα ανάπτυξης της διαδικασίας διάνοιξης. Πιο συγκεκριμένα η καθίζηση που αντιστοιχεί στο πρώτο βήμα της 1^{ης} περίπτωσης είναι 13.26cm ενώ στην 3^η περίπτωση 13.38cm ήτοι διαφορά 1.2mm. Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στην προσομοίωση του διαταραγμένου εδάφους. Η συνέχεια της διαδικασίας για την 1^η περίπτωση, προκαλεί στο σημείο μία ομαλή απεικόνιση, βαθμιαίας και ήπιας μεταβολής της καθίζησης, η οποία ολοκληρώνεται στο τέταρτο βήμα όπου αναπτύσσεται η μέγιστη τιμή 13.32cm (μεταβολή κατά 0.6mm), τιμή που διατηρείται σταθερή μέχρι και το τελευταίο βήμα διάνοιξης. Αντίθετα, η 3^η περίπτωση αποδίδει στο δεύτερο βήμα μία ραγδαία μεταβολή (0.8mm) με ανάπτυξη καθίζησης 13.46cm και μέγιστη τιμή 13.475cm στο τρίτο βήμα. Επιπλέον η τιμή αυτή ολοκλήρωσης της μέγιστης καθίζησης δεν διατηρείται σταθερή στα επόμενα βήματα, αλλά εμφανίζεται ένα σταδιακό ανασήκωμα που οφείλεται στην απόκτηση από την κατασκευή της σήραγγας των μόνιμων ιδιοτήτων της και της τελικής εγκατεστημένης της μορφής (ύπαρξη και ιδιότητα σκλήρυνσης ενέματος).

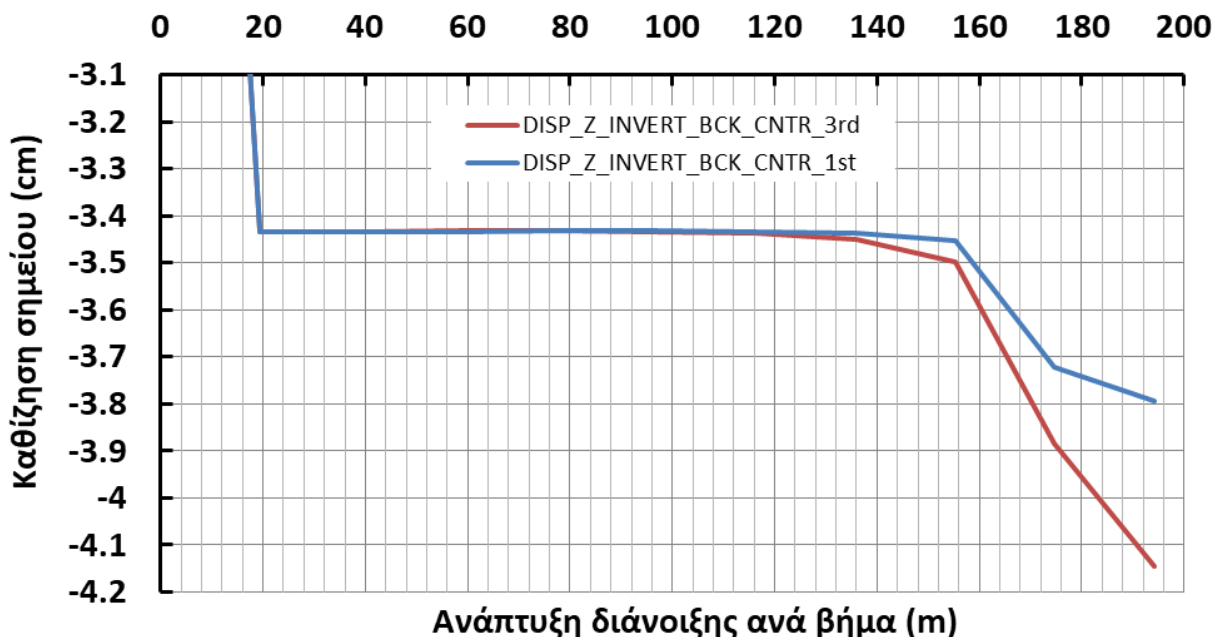
Η παραπάνω σύγκριση αφορά σημεία ελέγχου της επιφάνειας του εδάφους. Για την πληρότητα της σύγκρισης παρουσιάζονται ακόμη τα γραφήματα των σημείων με κωδικές ονομασίες *DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR* και *DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR* των επιφανειών «CROWN» και «INVERT» που βρίσκονται πλησιέστερα στην περιοχή διάνοιξης και διατάραξης, συγκεκριμένα 1m πάνω και 1m κάτω από την διανοιγόμενη περιοχή, αντίστοιχα.



Σχ. 5.288: Συγκριτικό γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου *DISP_Z_FRNT_CNTR* της επιφάνειας «CROWN» μεταξύ των περιπτώσεων ανάλυσης 1 (ένα) και 3 (τρία) ανά βήμα διάνοιξης

Το γράφημα (Σχ. 5.28) του σημείου *DISP_Z_CROWN_FRNT_CNTR* τα οποίο όπως έχει προαναφερθεί βρίσκεται πάνω από το πέρας του πρώτου βήματος διάνοιξης και την αρχή του δεύτερου, αποτυπώνει ευκρινέστερα την επίδραση του χαρακτηριστικών της διάνοιξης, της κωνικότητας του μηχανήματος TBM δημιουργώντας συνθήκες κενού και της διατάραξης του εδάφους, κατά την 3^η περίπτωση, παρουσιάζοντας στο πρώτο βήμα καθίζηση 9.47cm σε αντίθεση με την 1^η περίπτωση όπου αναπτύσσεται η τιμή 9.13cm. Η διαφορά αυτή (3.4mm) οφείλεται στα παραπάνω χαρακτηριστικά καθώς σε αντίθετη περίπτωση οι δύο απεικονίσεις θα έπρεπε να ξεκινούν από την ίδια τιμή καθίζησης, στο πρώτο βήμα, όπως ισχύει για όλα τα άλλα σημεία ελέγχου και για τις 3 (τρεις) επιφάνειες. Επιπλέον η μεταβολή της καθίζησης που αναπτύσσεται κατά το δεύτερο βήμα με αύξηση κατά 1.9mm είναι ραγδαία και οφείλεται περαιτέρω στην εμφάνιση του μη σκληρυμένου ενέματος ως επένδυση του τμήματος της σήραγγας, κάτι που δεν αποτυπώνεται στην απεικόνιση της 1^{ης} περίπτωσης όπου συμβαίνει μία ήπια, ομαλή μεταβολή (1.1mm) αύξησης της καθίζησης η οποία ολοκληρώνεται στο τέταρτο βήμα. Και οι δύο απεικονίσεις παρουσιάζουν ανασήκωμα μετά την ολοκλήρωση των μεταβολών

στην καθίζησή τους και την απόκτηση της μέγιστης τιμής της. Ωστόσο η κατάσταση αυτή αναπτύσσεται διαφορετικά για την κάθε περίπτωση με διατήρηση της ραγδαίας απόκρισης του σημείου της 3^{ης} λόγω της ιδιότητας σκλήρυνσης του ενέματος, σε αντίθεση με την εξομαλυμένη απεικόνιση της 1^{ης}.



Σχ. 5.295.29: Συγκριτικό γράφημα καθίζησης του σημείου ελέγχου *DISP_Z_BCK_CNTR* της επιφάνειας «INVERT» μεταξύ των περιπτώσεων ανάλυσης 1 (ένα) και 3 (τρία) ανά βήμα διάνοιξης

Το σημείο *DISP_Z_INVERT_BCK_CNTR* (Σχ. 5.295.29) υφίσταται επίσης την επίδραση των χαρακτηριστικών της 3^{ης} περίπτωσης κατά τα τελευταία βήματα της διαδικασίας διάνοιξης λόγω της θέσης του κάτω από το πέρας του ένατου και την αρχή του δέκατου βήματος κατά 1m. Συγκεκριμένα και οι δύο απεικονίσεις παρουσιάζουν σταθερή εικόνα με την ανάπτυξη του ίδιου μεγέθους καθίζησης με τιμή 3.43cm που οφείλεται αποκλειστικά στην επιφανειακή καταπόνηση, μέχρι το όγδοο βήμα για την 1^η περίπτωση και το έβδομο βήμα για την 3^η όπου η διαδικασία διάνοιξης ενσωματώνει την επιρροή της. Η διαφορά κατά ένα βήμα ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις εμφανίζεται λόγω των χαρακτηριστικών του μηχανήματος και της διατάραξης του εδάφους.

Ωστόσο στο όγδοο βήμα και οι δύο περιπτώσεις αντιλαμβάνονται την ακαριαία παραμόρφωση του εδάφους πολύ κοντά στην περιοχή διάνοιξης με μεταβολές αύξησης της καθίζησης κατά 3.4mm για την 1^η περίπτωση και 6.5mm για την 3^η (διαφορά κατά 3.1mm). Η απόκριση του σημείου στην 3^η περίπτωση αποτυπώνεται επίσης περισσότερο ραγδαία, με

αποτέλεσμα την μέγιστη καθίζηση με τιμή 4.15cm ενώ στην 1^η αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή 3.79cm ήτοι διαφορά 3.6mm . Η διαφορά των δύο τιμών μεταξύ της τιμής διαφοράς των μεταβολών και αυτής των μέγιστων καθιζήσεων συμβαίνει λόγω της έναρξης της επίδρασης της διαδικασίας διάνοιξης, στην 3^η περίπτωση, κατά ένα βήμα πριν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα, πρωτοτυπία εργασίας και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

6.1 Συμπεράσματα

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός πλήρους, ακριβούς και αξιόπιστου παραμετρικού μοντέλου πληροφορίας και προσομοίωσης, του έργου της μηχανοποιημένης σήραγγας με την μέθοδο TIM μοντελοποίησης. Το μοντέλο αυτό έπειτα από ανάλυση, απέδωσε τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, εν προκειμένω τις καθιζήσεις, συγκεκριμένων επιφανειών και σημείων εποπτείας, με την παράλληλη ανάδειξη των αυτοματοποιημένων διαδικασιών, στο στάδιο σχεδιασμού, για το οποίο προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αφορούν κυρίως τη διαδικασία κατασκευής και την αλληλεπίδραση της με το έδαφος.

Η παρούσα εργασία προσανατολίστηκε ακόμη, στη διερεύνηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι σύγχρονες υπολογιστικές δομές, καθώς και μέσω αυτών, ασχολήθηκε με ένα μεγάλο εύρος παραγόντων και ζητημάτων που αποτελούν την συνολική διαδικασία του έργου και του τρόπου προσέγγισής της, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση της μεθόδου που εφαρμόζεται και στην διεξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων για διάφορους τομείς ενδιαφέροντος.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν τα πραγματικά σχέδια οριζοντιογραφίας και μηκτομής, του έργου του μετρό, του Νομού Αττικής, από τα οποία επιλέχθηκε ένα τμήμα προς μελέτη, της περιοχής της Νίκαιας, μήκους περίπου *200m* (το ακριβές μήκος είναι *194.1m*).

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε κώδικας ανάδειξης των δυνατοτήτων της παραμετρικής προσομοίωσης και των αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Η σχεδίαση και απόδοση του μοντέλου προσομοιώματος της σήραγγας, πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Revit με την δυνατότητα παραμετροποίησης του προς διερεύνηση προσομοιώματος και διατήρησης όλης της απαραίτητης δομικής πληροφορίας, με χρήση υπερσυνδεδεμένων δεδομένων. Ακολούθησε, η χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus για την διακριτοποίηση και την αριθμητική ανάλυση του προσομοιώματος προς υπολογισμό και απόδοση των μεγεθών στόχου.

Η συγκεκριμένη εργασία αναλαμβάνει την αξιολόγηση εναλλακτικών περιπτώσεων και λύσεων, καθώς για την εξασφάλιση ενός βέλτιστου σχεδιασμού είναι σημαντική η αξιολόγηση τους. Πιο συγκεκριμένα έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την περίπτωση του πραγματικού βάθους των *25m* (υπερκάλυψη εδάφους) διάνοιξης της σήραγγας του έργου του μετρό και της περίπτωσης ρηχής σήραγγας, βάθους υπερκάλυψης *10m* ιδίων συνθηκών. Για μία πιο ολοκληρωμένη άποψη δημιουργήθηκε ένα ακόμη μοντέλο προσομοίωσης, μέσω της σύνδεσης τεσσάρων υπομοντέλων: εδάφους, σήραγγας και ενέματος, μηχανήματος TBM και υφιστάμενης δόμησης της επιφάνειας, με μία κατάλληλη διαμόρφωση του επιπέδου λεπτομέρειας για το καθένα, συγκρίνοντας επίσης τα αποτελέσματα των καθιζήσεων με τις

προηγούμενες περιπτώσεις. Όλα αυτά αφορούν ένα συνολικό προσομοίωμα που χαρακτηρίζεται από την έννοια ανάπτυξης μίας σταδιακή διάνοιξης, συνολικού αριθμού προόδου 10 (δέκα) βημάτων.

Από την εφαρμογή της συνολικής διαδικασίας και τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω αυτής, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η συνολική αντιμετώπιση και διαμόρφωση της διαδικασίας με προσανατολισμό στην μέθοδο BIM μοντελοποίησης, μέσω αυτοματοποιημένων ενεργειών προσφέρει ταχύτητα και ευελιξία με ταυτόχρονη διατήρηση της εγκυρότητας, της αξιοπιστίας και της ακρίβειας σε ότι αφορά την συμπεριφορά των μοντέλων και την απόδοση των αποτελεσμάτων.
- Ο τρόπος οργάνωσης της πληροφορίας, καθώς και η δομή και ο τρόπος συσχέτισης των μοντέλων σε όρους παραμετρικής μοντελοποίησης παρέχουν την δυνατότητα της άμεσης, κατάλληλης και αποδοτικής διαχείρισης και εποπτείας, προς αποφυγή και μείωση του παράγοντα των σφαλμάτων.
- Αυξάνονται οι δυνατότητες των επεκτάσεων της διαδικασίας στους τομείς βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, προς μείωση του παράγοντα διακινδύνευσης, καθώς και έλεγχου και διατήρησης του χρονικού και οικονομικού προϋπολογισμού.
- Παρέχεται η δυνατότητα να ληφθούν υπόψη περισσότεροι παράμετροι της διαδικασίας ώστε να αναδειχθεί η συμμετοχή και η επίδραση τους στην απόκριση του συστήματος. Ωστόσο η αύξηση των παραμέτρων που αλληλοεπιδρούν συνεπάγεται και την αύξηση του υπολογιστικού φορτίου και χρόνου.
- Το προσομοίωμα της ρηχής σήραγγας, τιθέμενο υπό γραμμική, ελαστική, στατική ανάλυση δεν παρουσίασε διαφορές στις τιμές των καθιζήσεων πέραν των αναμενόμενων. Η εκτέλεση μη γραμμικών αναλύσεων καθώς επίσης και η προσομοίωση ολόκληρου του συστήματος και όχι μόνο της συμμετρικής προσαρμοσμένης απεικόνισης προκαλούν αύξηση του υπολογιστικού φορτίου και χρόνου.
- Στον τομέα της προσομοίωσης, σε ότι αφορά τις καθιζήσεις του εδάφους, η σήραγγα ως τμηματικά συνεχές κέλυφος αποτελεί ικανοποιητική και αποδοτική περίπτωση προσομοίωσης. Ακόμη, για μικρές παραμορφώσεις, τα γραμμικά ελαστικά υλικά που συμμετέχουν στην διαδικασία διάνοιξης και υλοποίησης της κατασκευής της σήραγγας αποτελούν λογική παραδοχή.
- Το ένεμα, το σχήμα του μηχανήματος καθώς και η δημιουργούμενη τοπική διαταραχή με απώλεια όγκου του εδάφους κατά τη διάνοιξη επηρεάζουν σημαντικά τις παραμορφώσεις του. Συγκεκριμένα, η παρουσία του ενέματος, μεταξύ άλλων, μειώνει αρχικά τον ρυθμό μεταβολής, αύξησης των καθιζήσεων και εν' συνεχεία μέσω της χρονικά μεταβαλλόμενης ιδιότητας σκλήρυνσης, επιβάλλει ανακούφιση στο προφίλ των καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους.

6.2 Πρωτοτυπία εργασίας

Η πρωτοτυπία της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνίσταται στα παρακάτω:

- Στην προσομοίωση ενός μη συμμετρικού συστήματος ενδοσυνδεδεμένων μοντέλων
- Στην ανάπτυξη κώδικα, παραμετρικής ανάπτυξης των γεωμετριών και των ατομικών ενδοσυνδεδεμένων μοντέλων καθώς και προετοιμασίας τους κατά την αριθμητική προσομοίωση

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σύμφωνα με τα όσα εκτέθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προτείνονται τα ακόλουθα ζητήματα προς περαιτέρω διερεύνηση:

- Η ποροελαστική γεωστατική ανάλυση και η διερεύνηση του φαινομένου της στερεοποίησης κατά την διαδικασία διάνοιξης, σε ότι αφορά τις αναπτυσσόμενες πιέσεις στη σήραγγα και τις παραμορφώσεις του εδάφους και την επιρροή τους στην επιφανειακή δόμηση, ιδίως για τις ρηχές σήραγγες
- Προσομοίωση του μοντέλου εδάφους με χαρακτηριστικά μη γραμμικής συμπεριφοράς
- Τυχηματικά δυναμικά φαινόμενα κατά τη διαδικασία διάνοιξης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση:

Dehghan A.N., Bagheri E, Khodaei M., Kalehsar R.I., 2020, [Evaluating the effect of EPBM operational parameters on surface settlement in soft ground | Journal of Geophysics and Engineering | Oxford Academic \(oup.com\)](#)

Egger A., Saputra A., Triantafyllou S., Chatzi E., 2019, [Exploring Topology Optimization on Hierarchical Meshes by Scaled Boundary Finite Element Method](#)

Gall V.E., Marwan A., Smarslik M., Obel M., Mark P., Meschke G., 2017, [A holistic approach for the investigation of lining response to mechanized tunneling induced construction loadings - ScienceDirect](#)

Jenck O., Dias D., 2005 [Tunnelling on urban areas: 3D numerical analysis of soil/structure interaction \(researchgate.net\)](#)

Kavvadas M., Litsas D., Vazaios I., Fortsakis P., 2017, [Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling - ScienceDirect](#)

Koch C., Vonthron A., König M., 2017, [A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects - ScienceDirect](#)

Ninic J., Freitag S., Meschke G., 2015, [A hybrid finite element and surrogate modelling approach for simulation and monitoring supported TBM steering - ScienceDirect](#)

Ninic J., 2019, "SATBIM" Simulations for multi-level Analysis of interactions in Tunnelling based on the Building Information Modelling technology, SATBIM - Marie Curie Fellowship, Technical Report

Verruijt A., 2014, Theory And Problems Of Poroelasticity

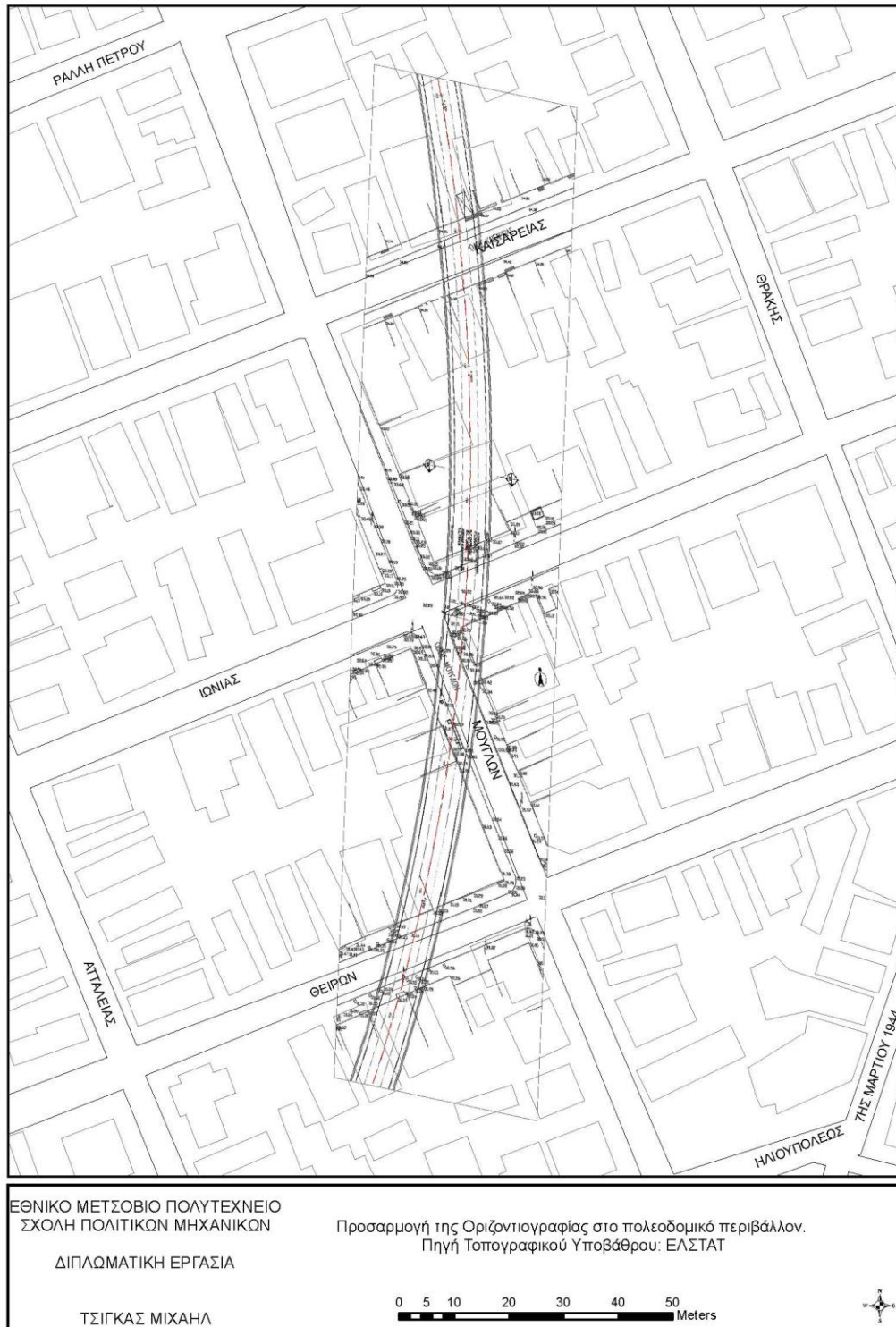
Zizka Z., Thewes M., 2016, [Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground](#), Published by: Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB) German Tunnelling Committee (ITA-AITES)

Ελληνική:

Καββαδάς Μ. (Αθήνα, 2016), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Τσότρας

Προβατίδης Χ. (Αθήνα, 2016-2017), Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Κατασκευών, Εκδόσεις Τζιόλα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Σχ. 6.1: Απόσπασμα πρωτότυπου σχεδίου οριζοντιογραφίας - Προσαρμογή τμήματος της οριζοντιογραφίας σε τοπογραφικό υπόβαθρο της ΕΛΣΤΑΤ με γεωγραφική αναφορά στο Ελληνικό Γεωστατικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ '87



Σχ. 6.2: Εντοπισμός κτιρίων (πολύγωνα) με κέντρο βάρους εντός της περιοχής μελέτης